

**Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»**

*Г. Н. Солопченко*

**ЭЛЕКТРОНИКА  
И  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

**Часть 2**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2010**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	6
1. Современное состояние измерительных информационных технологий.....	10
1.1. Номенклатура основных величин, подлежащих измерениям в промышленности, научных исследованиях, медицине, экологии .....	12
1.2. Метрология и метрологическое обеспечение .....	14
2. Исходные понятия и основные этапы измерительных информационных технологий .....	17
2.1. Средства измерений: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные информационные системы .....	17
2.2. Характеристики качества результатов измерений .....	22
2.3. Правила округления при измерениях .....	25
2.4. Основные этапы измерительных технологий .....	26
2.5. Примеры взаимодействия датчиков с объектом измерений .....	29
3. Метрологические структурные схемы измерительных каналов измерительных информационных систем .....	35
3.1. Статический режим измерений, прямые измерения .....	36
3.1.1. Общая метрологическая структурная схема .....	36
3.1.2. Примеры погрешности применения средства измерений .....	41
3.1.3. Частная метрологическая структурная схема. Измерительный канал линейный .....	43
3.1.4. Частная метрологическая структурная схема. Отличие функции преобразования измерительного канала от линейной незначительно .....	47
3.2. Динамический режим измерений, прямые измерения .....	49
3.2.1. Применяемые средства измерений .....	49
3.2.2. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины .....	50
3.2.3. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью цифровых средств измерений .....	53
3.3. Косвенные измерения .....	57
3.4. Классификация погрешностей средств измерений и результатов измерений .....	60
3.5. Метрологические характеристики средств измерений, подлежащие нормированию .....	63
3.5.1. Общие положения .....	63
3.5.2. Характеристики погрешности средств измерений .....	64
3.5.3. Характеристики преобразования измеряемой величины и сигналов измерительной информации в измерительных информационных системах .....	67
3.5.4. Характеристики взаимодействия с объектом и внешними средствами измерений .....	71

3.5.5. Метрологические характеристики однозначных и многозначных мер ...	72
4. Организационные и правовые основы обеспечения единства измерений .....	73
4.1. Государственное управление обеспечением единства измерений .....	73
4.2. Государственные научные метрологические центры России .....	79
4.3. Международные метрологические организации .....	81
4.4. Передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений от государственных эталонов .....	83
4.5. Метрологическое обеспечение разработки, производства и применения средств измерений .....	87
5. Аналоговые электромеханические электроизмерительные приборы. Принципы действия, свойства .....	94
5.1. Общие характеристики и обозначения .....	94
5.2. Приборы магнитоэлектрической системы .....	100
5.2.1. Принцип действия, уравнение движения подвижной части .....	100
5.2.2. Простейшие применения магнитоэлектрических приборов .....	102
5.2.3. Применение в составе аналоговых электронных приборов .....	103
5.2.4. Магнитоэлектрические кулонометры и веберметры .....	105
5.3. Приборы электродинамической системы .....	106
5.4. Приборы ферродинамической системы .....	110
5.5. Приборы электромагнитной системы .....	111
5.6. Приборы электростатической системы .....	112
5.7. Приборы индукционной системы .....	114
5.8. Средства расширения пределов измерения и правила выбора подходящего предела .....	117
5.8.1. Типичные способы и средства расширения пределов измерения .....	117
5.8.2. Шунты .....	119
5.8.3. Добавочные резисторы .....	121
5.8.4. Измерительные трансформаторы тока .....	122
5.8.5. Измерительные трансформаторы напряжения .....	124
5.8.6. Правило выбора предела измерения .....	125
5.9. Применение аналоговых электромеханических электроизмерительных приборов для измерений в трехфазных цепях переменного тока .....	126
5.9.1. Измерение линейных токов и напряжений в трехфазной трехпроводной цепи .....	126
5.9.2. Измерение активной электрической мощности и энергии в симметричных трехфазных цепях одним прибором .....	127
5.9.3. Измерение реактивной электрической мощности и энергии в симметричных трехфазных цепях одним прибором .....	128
5.9.4. Измерение активной электрической мощности и энергии в трехфазных цепях с помощью двух приборов .....	130
6. Мостовые методы измерения параметров элементов электрических цепей .....	132
6.1. Мосты постоянного тока .....	132
6.1.1. Мосты постоянного тока в равновесном режиме .....	132
6.1.2. Мосты постоянного тока в неравновесном режиме .....	136
6.2. Мосты переменного тока .....	137
6.2.1. Условия равновесия мостов переменного тока .....	137
6.2.2. Мост переменного тока для измерения емкости конденсатора .....	139

6.2.3. Мост переменного тока для измерения индуктивности катушки .....	140
6.3. Метрологические характеристики мостов .....	141
7. Цифровые средства измерений .....	143
7.1. Цифроаналоговые преобразователи .....	143
7.2. Аналого-цифровые преобразователи .....	145
7.2.1. Аналого-цифровые преобразователи поразрядного уравнивания .....	145
7.2.2. Аналого-цифровые преобразователи "частота – код" .....	148
7.2.3. Аналого-цифровые преобразователи "интервал времени - код" .....	150
7.2.4. Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи .....	151
7.2.4.1. Аналого-цифровые преобразователи двойного интегрирования .....	151
7.2.4.2. Сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи .....	153
7.2.5. Метрологические характеристики аналого-цифровых и цифроаналоговых измерительных преобразователей .....	155
7.2.6. Связь цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей с компьютером .....	157
7.3. Цифровые измерительные приборы .....	158
7.4. Помехи и борьба с ними .....	161
8. Измерительные преобразователи неэлектрических величин .....	165
8.1. Средства и методы измерения температуры .....	165
8.1.1. Термоэлектрические датчики температуры .....	165
8.1.2. Термопреобразователи сопротивления проволоочные .....	170
8.1.3. Полупроводниковые термометры сопротивления .....	173
8.1.4. Другие виды термометрических измерений .....	174
8.1.4.1. Пирометры .....	174
8.1.4.2. Термоанемометры .....	176
8.2. Измерение деформаций .....	177
8.3. Тензорезистивные датчики .....	185
8.4. Пьезоэлектрические датчики .....	193
8.5. Потенциометрические датчики .....	199
8.6. Емкостные датчики .....	201
8.7. Индуктивные датчики .....	206
8.8. Трансформаторные (взаимно индуктивные) датчики .....	211
8.9. Линейный индуктосин .....	212
8.10. Гальваномагнитные датчики .....	216
8.10.1. Гальваномагнитные датчики Холла .....	216
8.10.2. Источники погрешности датчиков Холла .....	220
8.10.3. Магниторезистивные датчики .....	222
8.11. Датчики скорости вращения .....	223
8.12. Метрологические характеристики датчиков .....	226
Библиографический список .....	228

## ВВЕДЕНИЕ

Измерение становится важным видом человеческой деятельности еще на раннем этапе развития торговли, строительства, землевладения и навигации. Этот этап начался задолго до наступления новой эры в Древних царствах: ассиро-вавилонском и в Египте.

На ранних стадиях измерительный процесс заключался в простом счете количества содержания той или иной меры в измеряемой величине. Позднее, как свидетельствуют результаты многочисленных археологических исследований, под влиянием хозяйственной необходимости в Древней Вавилонии, в Древнем Египте, не говоря уже о Древней Греции и Риме, материальное обеспечение измерений заключалось в изготовлении и хранении мер, в основном мер длины, объема и массы, а также в организации процесса сопоставления значения измеряемой величины с мерой. Тем не менее, несмотря на сильное влияние стройной системы древнеегипетских мер, которая сложилась примерно в III веке до н. э., в разных государствах системы мер различались. Позже превалирующую роль начали играть системы мер, складывавшиеся в Древней Греции и Риме, но до унификации мер было еще далеко, и при выполнении торговых операций это создавало значительные трудности, которые преодолевались специальными соглашениями о согласовании мер. Древним прототипом одной из задач современной законодательной метрологии была задача согласования мер. Кроме того осуществлялись и надзорные действия, имевшие целью предотвращение злоупотреблений при измерениях.

Насколько важными были во все времена вопросы обеспечения единства и правильности практических измерений, свидетельствует такой авторитетный источник, как Библия, где содержатся многочисленные указания на это. Приведем лишь два из них.

“Гиря твоя должна быть точная и правильная..., чтобы продлились дни твои на Земле, которую Господь, Бог твой дает тебе” (Второзаконие, 25: 14).

“Неодинаковые весы, неодинаковая мера, то и другое – мерзость перед Господом” (Притчи Соломоновы, 20: 10).

Вплоть до XV века надзор за единством и правильностью измерений, сохранностью образцовых мер осуществляло духовенство. Образцовые меры находились на ответственном хранении в храмах, а для практического использования рассылались официальные копии этих мер с удостоверением их правильности. Кроме того с этим существенную регулирующую роль в области измерений играли директивные акты руководителей государств. В частности, большое историческое значение для становления единства измерений в России имела деятельность князей Владимира (Устав о церковных судах, X век), Святослава Ярославича (золотой пояс, как мера длины, XI век), Всеволода Мстиславича (Устав о церковных судах и о людех и о мерилах торговых 1134–1135 годы), царей Ивана Грозного и Петра Великого. Так, князь Всеволод Мстиславич, как это ранее делал Владимир, поручал “блюсти...мерила и спуды и звесы и ставила” высшим церковным иерархам и наказывал им, чтобы они заботились о сохранности порученных мер, “якоже и о душах человеческих”.

Основная научная деятельность в области измерений и обеспечении их единства в период времени до XV века состояла в попытках сопоставления и гармонизации систем мер, применяемых в государствах, ведущих торговые отношения. Примером такой деятельности могут служить сопоставительные измерения, которые производил дьякон Игнатий в 1389 году в Иерусалимском храме и в храме близ Истры.

Среди выдающихся достижений в области практических измерений следует отметить угловые измерения, выполненные Улугбеком в своей гигантской обсерватории близ Самарканда. В результате этих измерений задолго до изобретения оптических линз Улугбеку удалось построить карту звездного неба с погрешностью, не превышающей одной угловой минуты.

Начиная с XVII-XVIII веков в связи с ускорением развития науки и техники и для удовлетворения растущих потребностей в измерениях номенклатура измеряемых величин и соответствующих мер начала расширяться в точном соответствии с известным высказыванием Г. Галилея: “Измеряй все доступное измерению и делай доступным все недоступное ему”. Появилась необходимость в измерении температуры, давления,

плотности, скорости, ускорения, магнитных, а затем и электрических величин. Стали совершенствоваться методики выполнения измерений, появились новые средства измерений и методики их применения, которые нуждались в существенной теоретической поддержке. В области измерений и метрологии в XVIII веке вели исследования М. В. Ломоносов, Г. В. Рихман (электромметр и принцип преобразования электрических величин в силу), Л. Эйлер (теория весов), И. Ньютон (исторические исследования древнеегипетских мер), И. И. Ползунов (водяной манометр), А. К. Нартов (приборы для измерения механических величин) и многие другие. С другой стороны, совершенствование методов и средств измерений способствовало новым изобретениям и открытиям, ибо “каждая вещь известна лишь в той степени, в какой ее можно измерить” (Кельвин). Среди многих известных примеров, подтверждающих этот факт, можно назвать нормальную плотность распределения случайных величин, выведенную К. Гауссом на основе анализа разброса результатов многократных измерений, что явилось началом теории вероятностей, закон движения планет и закон земного притяжения, предложенные Кеплером по результатам измерений траекторий планет, Периодический закон Д. И. Менделеева, установленный им по результатам измерения масс атомов химических элементов, открытие Н. Бором “тяжелой воды” на основе точных измерений плотности воды, эксперименты А. М. Ампера, А. Вольты, Ш. Кулона, опыты и открытия Майкельсона, по результатам которых были развиты новые науки: спектроскопия и волновая оптика, и многие другие. В связи с этим актуальность завета Г. Галилея “Измеряй все доступное измерению и делай доступным все недоступное ему” не утрачивается и в настоящее время.

Ярким примером использования естественного измерительного прибора может служить предсказание Дж. Адамса и У. Леверье в 1845 году и последующее обнаружение астрономом И. Галле в 1846 году в предсказанном месте планеты Нептун по результатам точных измерений отклонения орбиты Урана от теоретической траектории. Роль измерительного прибора выполняла Солнечная система, стрелки или индикатора – орбита Урана. Математической моделью служила совокупность расчетных орбит известных в то время планет.

Отмеченный выше значительный подъем науки и техники в XVIII веке потребовал усовершенствования и гармонизации системы мер. С этой целью в России в 1736 году была образована комиссия об учреждении весов и мер под председательством графа М. Г. Головкина. Экспериментальной базой этой комиссии служила лаборатория Нартова. В конце XVII века во Франции была создана метрическая система мер, принятая в настоящее время в большинстве стран. XIX и XX столетия ознаменовались радикальным продвижением в направлении к унификации мировой системы мер. В 1842 году в России было создано Депо образцовых мер и весов во главе с академиком А. Я. Купфером, которое затем было преобразовано в Главную палату мер и весов, ныне – ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. С 1892 по 1907 год Главную палату мер и весов возглавлял Д. И. Менделеев. В 1875 году было образовано Международное бюро мер и весов (МБМВ) – первая международная организация на нашей планете. В этом же году первые 17 стран, и среди них Россия, подписали Международную метрическую конвенцию. В настоящее время эта конвенция подписана уже 48 странами.

Стремительное ускорение научно-технического прогресса в XX веке и связанные с этим не всегда удовлетворяющиеся потребности в измерениях вызывают повышенный интерес к развитию методов и средств измерений, ибо “новые средства измерений знаменуют собой настоящий прогресс” (Б. С. Якоби, 1857 год). Предназначение теории измерений в таких условиях – теоретическое обеспечение создания новых средств измерений, разработка прогрессивных методов выполнения измерений и обработки результатов, эталонов на новых физических принципах, опирающихся на физические константы, расширение номенклатуры величин, поддерживаемых эталонами.



## 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В XX веке стремительно расширилась номенклатура величин, в измерении которых нуждались фундаментальные и прикладные науки, промышленность, медицина, торговля. По данным АН СССР уже в 1970 году перечень величин, подлежащих измерениям в науке, народном хозяйстве и социальной сфере, содержал более 2000 наименований. Менее чем за два предшествующих столетия измерения, методы измерений и измерительные инструменты прошли путь развития от простейших измерений длины (строительство, землепользование), массы, объема (торговля), углов (навигация, астрономия) к измерению электрических величин (заряд, сила тока, напряжение), а далее в XX веке – до сложнейших *измерительных информационных технологий*, в которых используются последние достижения физики и самые совершенные средства вычислительной техники: от микропроцессоров до компьютерных сетей.

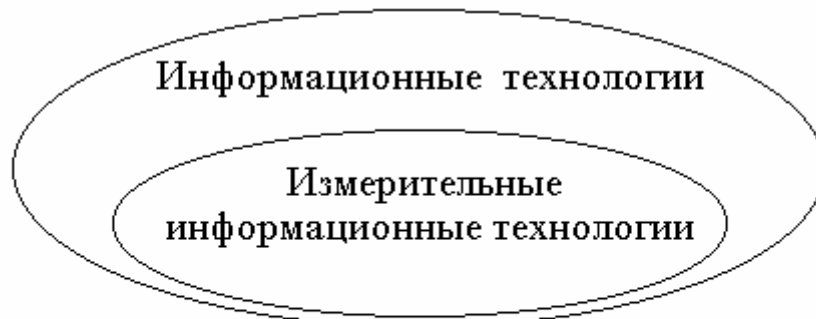


Рис. 1. Измерительные информационные технологии в области информационных технологий

*Измерительная информационная технологи* (measuring information technology) – технология подготовки и выполнения измерений, включающая в себя описание приемов осуществления информационного взаимодействия средств измерений (СИ) с объектом, а также методов получения, обработки, представления и передачи количественной информации о значениях измеряемых величин и обеспечивающая требуемую достоверность и сохранность этой информации.

Современные измерительные информационные технологии (ИИТ) являются подмножеством информационных технологий (рис. 1). Специфические признаки, выделяющие ИИТ из общего многообразия информационных технологий:

ярко выраженные познавательные цели и функции,  
получение первичной информации в результате специально организованного избирательного физического взаимодействия с объектом,  
особая ответственность за достоверность измерительной информации, возложенная действующим законодательством.

Продукция ИИТ – результаты измерений, которые “поставляются” для использования в иных информационных технологиях в качестве исходной информации.

На рис. 2 в укрупненном виде представлено функционирование (поведение) любой технической, управленческой, социальной или биологической системы, как последовательность операций, первой среди которых

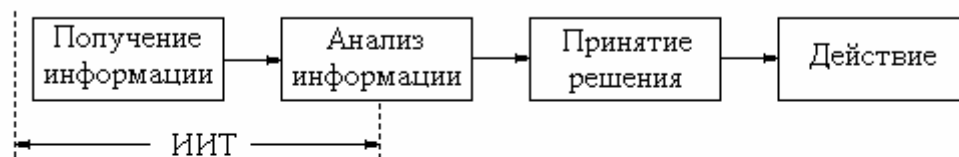


Рис. 2. Место ИИТ в технических системах управления, в испытаниях продукции, в экологическом мониторинге, в медицинской диагностике и других сферах деятельности

является получение первичной информации от объекта в результате информативного взаимодействия с ним. Конкретная форма, в которой исполняется эта первая операция в той или иной сфере деятельности, различна. В научных исследованиях, при разработке, производстве и эксплуатации промышленных объектов, технических средств, транспорта, систем управления, при экологическом мониторинге, во многих других сферах первое действие – измерения. В поведении человека или иной биологической системы источником первичной информации являются органолептические измерения, в армии – разведывательные действия, в социальных и государственных системах – социологический опрос. Понятно, что конечный результат действий в большой степени зависит от качества информации, по-

лучаемой на первом этапе, поэтому к ней должны предъявляться весьма высокие требования.

Обеспечение взаимного доверия к результатам измерений в таких сферах, как торговля, экология, научно-техническая кооперация, Интерпол, является важнейшим фактором развития международного сотрудничества. Решение этой задачи в масштабе планеты достигается благодаря созданию, совершенствованию, хранению и международному сличению государственных эталонов, разработке единых правил и норм выполнения измерений. Такие задачи решаются на основе межправительственных соглашений под методическим руководством международных метрологических организаций, среди которых в первую очередь следует выделить Международное Бюро Мер и Весов (МБМВ, создано 20 мая 1875 года в день подписания метрической конвенции) и Международную Организацию Законодательной Метрологии (МОЗМ, создана в 1963 году). Деятельность этих организаций поддерживается международной организацией по стандартизации (ИСО). С ними тесно сотрудничает Международная Электротехническая Комиссия (МЭК). Кроме перечисленных крупных организаций действуют региональные организации на территориях Европы, Северной Америки, Азии и других континентов.

### **1.1. Номенклатура основных величин, подлежащих измерениям в промышленности, научных исследованиях, медицине, экологии**

Основополагающая роль и значение измерений для развития сфер науки, промышленности, здравоохранения, торговли и услуг станет понятной из перечисления величин, которые подлежат измерениям в этих сферах:

- параметры нанотехнологий,
- состав и свойства материалов, сплавов, газов, смесей, в том числе характеристики качества пищевых продуктов,
- интенсивность и доза излучений – инфракрасных, видимых, ультрафиолетовых, лазерных, электромагнитных, радиационных,
- акустические величины,
- температура от 4 до 3000 °К и более,

масса, сила, твердость, деформации, моменты вращения и торможения,

давление, уровень, скорость и расход жидкостей и газов, в том числе, агрессивных,

параметры вибраций (виброперемещения, виброскорость и виброускорение),

линейные и угловые путь, скорость, ускорение,

все электрические величины (сила тока, напряжение, параметры переменного тока и напряжения, электрические мощность и энергия, поверхностный и объемный электрический заряд, электрические характеристики материалов, параметры электрических, магнитных и электромагнитных полей, параметры электрических цепей – сопротивление, индуктивность, емкость и многие другие),

параметры окружающей среды, влияющие на безопасность жизнедеятельности людей, параметры биологических объектов,

параметры человеческого организма, подлежащие измерениям при диагностике, лечении, лабораторном и клиническом анализе, при медицинском обследовании,

параметры биотехнологий и нанотехнологий

параметры промышленных выбросов, подлежащие экологическому мониторингу.

Диапазоны изменения величин, подлежащих измерениям, постоянно расширяются и распространяются от наноразмеров до мега размеров. Кроме того расширяются условия, в которых приходится выполнять измерения: сверхвысокие и сверхнизкие температуры и давления, виброускорения, удары, излучения и т. п.

## **1.2. Метрология и метрологическое обеспечение**

*Метрология* (metrology) – сфера деятельности и наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

*Измерение* (measurement) – познавательный процесс, заключающийся в нахождении численного значения измеряемой величины (of a measurand)

опытным путем с помощью специальных технических средств, называемых средствами измерений.

*Измеряемая величина* (measurand) – величина, подлежащая измерению.

*Величина* (quantity) – свойство (атрибут) физического объекта (явления, вещества, изделия, биологического объекта), которое может определяться количественно.

*Размер величины* (size of a quantity) – количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию “величина”.

*Значение величины* (value of a quantity) – выражение размера величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

*Единица величины* (unit of a quantity) – величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице.

*Единство измерений* (traceability of a measurement) – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Достижение единства измерений приводит к обеспечению взаимного доверия к результатам измерений вне зависимости от места их выполнения. Подобное состояние измерений приобретает особое значение для научного, технического и экономического сотрудничества и торговли, при разрешении спорных вопросов и претензий как внутри стран, так и на межгосударственном уровне. Не случайно поэтому первым межгосударственным соглашением в истории нашей планеты, подписанным 20 мая 1875 года, стала Метрическая конвенция, а первой межправительственной организацией – Международное бюро мер и весов (МБМВ или в латинской аббревиатуре французского происхождения – BIPM).

Государственное управление по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет Федеральное агентство РФ по стандартизации, метрологии и сертификации через государственные научные метрологические центры (метрологические институты), территориальные органы государственного метрологического надзора, действующие во всех субъектах Федерации, а также через метрологические службы юридических лиц, аккредитованные в установленном порядке.

*Метрологическое обеспечение* (metrological assurance) – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, которые выполняются во всех сферах деятельности человека.

Метрологическое обеспечение отраслей науки и промышленности, экологического мониторинга, здравоохранения, торговли, контроля безопасности, вооружений и судебного производства заключается в выполнении следующих основных функций:

разработка, изготовление и хранение государственных эталонов, воспроизводящих единицы измеряемых величин,

осуществление международных сличений государственных эталонов, передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений,

разработка законодательных актов и нормативных документов в области метрологии и практических измерений, контроль за их исполнением,

разработка и промышленный выпуск рабочих средств измерений,

контроль за состоянием и сохранностью декларированных производителем метрологических свойств средств измерений, выпускаемых из производства, а также находящихся в эксплуатации или на хранении,

выполнение рабочих измерений во всех сферах деятельности и в отраслях народного хозяйства,

разработка методик выполнения измерений, включающих в себя методики оценки характеристик погрешностей результатов измерений, выполнение измерений, контроль за исполнением методик выполнения измерений.

Основные работы по метрологическому обеспечению, выполняемые в интересах государства, а именно разработка и хранение государственных эталонов, фундаментальные исследования в области метрологии, разработка государственных нормативных документов, государственный метрологический надзор подлежат обязательному государственному финансированию. При разработке федеральных и иных государственных программ, в том числе программ по созданию и развитию производства оборонной техники в них должны быть предусмотрены разделы метрологического обеспечения.

К подобным программам относятся программы по обеспечению всех видов безопасности населения в отношении причин техногенного, экологического, медицинского, преступного и иного характера.

## **2. ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

### **2.1. Средства измерений: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные информационные системы**

Качество выполняемых измерений в значительной степени определяется качеством применяемого технологического оборудования и корректностью его использования в измерительных технологиях.

Используемое технологическое оборудование:

измерительные инструменты – средства измерений – основное оборудование,

вспомогательное оборудование, в том числе, средства вычислительной техники – компьютеры, процессоры, микропроцессоры, периферийные устройства, средства передачи и хранения информации.

*Средство измерений* (measuring instrument) – техническое средство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

*Метрологические характеристики* (metrological characteristics) – характеристики свойств средств измерений, оказывающих влияние на результаты и погрешности измерений.

Качество основного технологического оборудования – средств измерений определяется его метрологическими характеристиками, их сохранностью во времени и независимостью от действия внешних влияющих факторов.

Средства измерений подразделяются на следующие 4 вида.

*Мера* (material measure) – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины одного или нескольких заданных размеров с нормированной точностью.

*Однозначная мера* – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера. Например, гиря, стержень длиной 1 метр, нормальный элемент, катушка сопротивления размером 1 Ом, стандартный образец двухкомпонентного вещества (газа, жидкости, сплава).

*Многозначная мера* – мера, воспроизводящая одну физическую величину нескольких размеров. Например, набор гирь разной массы, магазин сопротивлений.

*Стандартный образец* – мера в виде вещества (материала), состав или свойство которого установлены при аттестации.

*Калибратор* – многозначная мера, как правило, допускающая управление от компьютера.



*Измерительный прибор* (measuring instrument) – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой величины в форме, доступной для непосредственного восприятия оператором.

*Аналоговые и цифровые* измерительные приборы отличаются видом представления (индикации) значений измеряемой величины. Множество значений, которые представляет индикатор аналогового прибора, непрерывно. Самыми распространенными аналоговыми измерительными приборами являются стрелочные измерительные приборы, в которых отсчет значения измеряемой величины осуществляется по взаимному положению стрелки (или иного указателя) и материальной шкалы. При этом чаще всего подвижная стрелка перемещается относительно неподвижной шкалы. Иногда подвижной является шкала, а стрелка (указатель) неподвижна. В некоторых аналоговых приборах (например, в ртутных термометрах) значение измеряемой величины преобразуется в длину визуального фиксируемого отрезка, снабженного шкалой.

Индикатор цифрового прибора цифровой. Он представляет результаты измерений в единицах измеряемой величины из дискретного множества значений, разделенных, как правило, одинаковыми интервалами, называемыми *интервалами квантования*. Ширина интервала квантования есть не что иное, как погрешность округления. Она обратно пропорциональна количеству разрядов кода (в основном, десятичного), применяемого в конкретном приборе.

*Измерительный преобразователь* (measuring converter) – средство измерений, предназначенное для взаимно однозначного преобразования *сигнала измеряемой величины* или *сигнала измерительной информации*, действующего на входе преобразователя, в выходной сигнал, удобный для дальнейших преобразований, обработки, передачи и (или) хранения.

*Сигнал измеряемой величины* – изменяющаяся во времени измеряемая величина. Сигнал измеряемой величины – частный случай сигнала измерительной информации.

*Сигнал измерительной информации* – сигнал, функционально взаимно однозначно связанный с сигналом измеряемой величины.

Выходной сигнал измерительного преобразователя не может быть непосредственно воспринят оператором, без применения индикатора.

*Датчик* (сенсор, первичный измерительный преобразователь) – измерительный преобразователь, на входе которого непосредственно действует измеряемая величина. Под действием измеряемой величины датчик вырабатывает сигнал измерительной информации, то есть сигнал, функционально взаимно однозначно связанный с сигналом измеряемой величины.

Измерительными преобразователями кроме датчиков являются усилители, фильтры (вторичные измерительные преобразователи), коммутаторы, преобразователи непрерывных (аналоговых) величин в цифровой код (*аналого-цифровые преобразователи*, АЦП), преобразователи цифрового кода в аналоговый сигнал тока или напряжения (*цифроаналоговые преобразователи*, ЦАП).

Примеры измерительных преобразователей – термопара, измерительный трансформатор, измерительный усилитель, термометр сопротивления, датчики давления, параметров вибраций, скорости газа и пр.

*Измерительная информационная система* (measuring information system) – средство измерений, предназначенное для измерения нескольких однородных или неоднородных величин и представляющее собой совокупность датчиков, измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, в том числе, компьютеров, функционирующих как единое целое.

Структура современных измерительных информационных систем (ИИС) представлена на рис. 3.

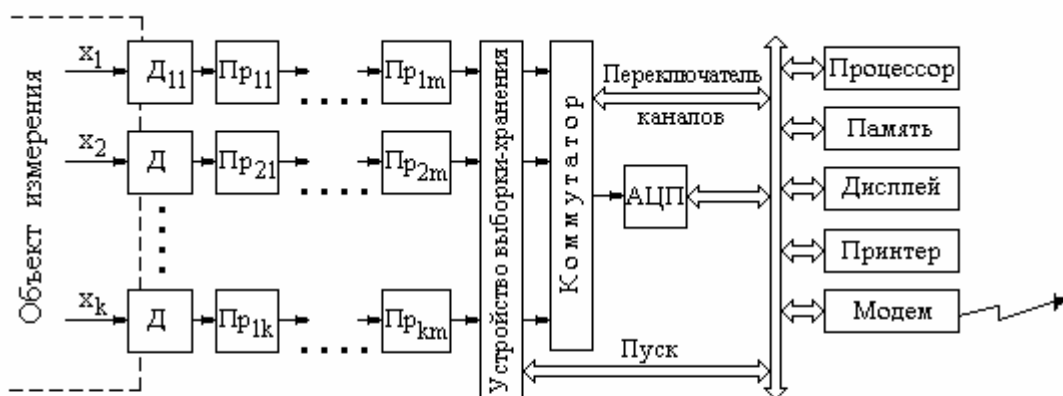


Рис. 3. Типовая структура современных измерительных информационных систем

Обычно количество измерительных каналов в ИИС достигает нескольких (до нескольких тысяч) измерительных каналов. Каждый канал представляет собой последовательное соединение измерительных преобразователей, первым из которых является датчик. С помощью коммутатора, управляемого от процессора, сигналы измерительной информации каждого  $j$ -го канала поочередно подключаются на вход АЦП, на выходе которого при каждом таком подключении формируется числовое значение соответствующей измеряемой величины, как правило, в двоичном коде. Переключение каналов в ИИС выполняется последовательно в моменты времени  $t_i + (j - 1)\Delta t$ , где  $t_i$  – время подключения к АЦП первого канала,  $j$  – номер канала,  $\Delta t$  – время, которое в соответствии с принятым в ИИС интерфейсом затрачивается на выполнение протокола обмена между компьютером и коммутатором, между компьютером и АЦП, на выполнение компьютером программ управления, на аналого-цифровое преобразование, а также на срабатывание устройств сопряжения. Однако, несмотря на различие моментов измерения, все результаты относятся к одному моменту, а именно к началу цикла опроса каналов  $t_i$ . Если измеряемые величины изменяются со скоростью  $dx_j / dt$ , то результат измерения  $j$ -ой величины будет содержать погрешность

$$\Delta x_{aj} = x_j(t_i + (j - 1)\Delta t) - x_j(t_i) \approx \Delta t(j - 1)(dx_j / dt).$$

Эта погрешность, вызванная неопределенностью момента измерения, называется *апертурной погрешностью*. Она появляется только в том случае, когда измеряемые величины существенно изменяются за время опроса каналов. В статическом режиме измерений, когда измеряемые величины почти не изменяются, апертурная погрешность отсутствует.

Средством практически полного исключения апертурной погрешности может служить многоканальное устройство выборки-хранения, все каналы которого в момент запуска от компьютера переходят из режима слежения, когда сигнал на выходе повторяет сигнал на входе, в режим запоминания. Таким образом, на выходе всех каналов устройства выборки-хранения оказываются неизменные значения всех сигналов, соответствующие одному и тому же значению времени запуска  $t_i$ . Эти значения последовательно преобразуются АЦП в двоичный код и передаются в ком-

пьютер, в котором каждое из полученных двоичных чисел сопоставляется со шкалой соответствующей измеряемой величины. В результате такого сопоставления формируются значения измеряемых величин в их единицах и тем самым выполняется прямое измерение. Последующие операции (математическая обработка, хранение, передача, визуализация результатов измерений) производятся в соответствии с целями эксперимента компьютером и иными средствами, входящими в состав системы.

Многие современные ИИС строятся на базе компьютерных сетей. Диспетчеризация работы таких распределенных ИИС и обмен информацией выполняются с помощью сетевого программного обеспечения и средств межмашинной связи (телефонные каналы, радиоканалы, оптоволоконные линии связи, каналы спутниковой связи и др.). Для соединения с этими каналами предусматривается соответствующий модем.

## 2.2. Характеристики качества результатов измерений

Результат любого измерения отличается от истинного значения измеряемой величины в силу следующих причин:

- несовершенство средств измерений,
- некорректное применение средств измерений, в результате которого могут изменяться свойства объекта,
- воздействие на средство измерений разнообразных мешающих факторов, называемых *влияющими величинами*.

*Влияющая величина* (influence quantity) – величина, оказывающая влияние на результаты и на погрешности измерений, но не являющаяся измеряемой.

Предположим, что измеряемая величина не изменяется во времени, а ее истинное значение есть  $x$ . Пусть  $\tilde{x}$  – результат измерения, тогда разность  $\Delta x = \tilde{x} - x$  есть *абсолютная погрешность результата измерений*.

Истинное значение измеряемой величины, конечно, неизвестно. Поэтому далее этот термин будем использовать в качестве модельного поня-

тия, которое участвует в описании математической модели измерений и их погрешностей.

*Абсолютная погрешность результата измерений* (absolute error) – разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, выражается в единицах измеряемой величины.

Значение абсолютной погрешности не может быть определено в виде числа из-за того, что истинное значение  $x$  измеряемой величины неизвестно. Поэтому результат каждого измерения содержит неустранимую неопределенность значения измеряемой величины, и на практике может идти речь об оценке только каких-либо характеристик погрешности измерений, но не значений погрешности. Наиболее распространенной характеристикой погрешности является интервал  $(\Delta_H, \Delta_B)$ , ограниченный предельными или предельно допускаемыми значениями. Обычно принимают  $\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X$ , то есть считают этот интервал симметричным относительно нуля:  $(-\Delta_X, \Delta_X)$ .

В общем случае погрешность измерения  $\Delta x$  может содержать систематическую и случайную составляющие.

*Систематическая составляющая погрешности, систематическая погрешность*) – погрешность, значения которой остаются неизменными при повторных измерениях одной и той же неизменной измеряемой величины в одинаковых условиях.

*Случайная составляющая погрешности, случайная погрешность* – погрешность, значения которой изменяются случайным образом при повторных измерениях одной и той же неизменной измеряемой величины в одинаковых условиях.

При многократном измерении величины, истинное значение которой равно  $x$ , результаты измерений будут попадать на ось с различной плотностью, которая определяется характером случайной составляющей погрешности. Обычно с наибольшей плотностью результаты измерений группируются вблизи значения  $x + \Delta_C$ , где  $\Delta_C$  – систематическая составляющая погрешности измерений. В этом случае вид кривой, описывающей плотность распределения результатов измерений, будет иметь колоколообразный вид (рис. 4, а). Пусть  $\tilde{x}$  – один из результатов измерений. В соответс-

твии с определением абсолютной погрешности можно заключить, что форма плотности распределения  $\Delta x = \tilde{x} - x$ , представленная в левой части рис. 4, а, должна повторять форму плотности распределения результатов измерений. Тогда назначают такие границы  $(-\Delta_X, \leq \Delta_X)$ , чтобы интервал, лежащий между ними, содержал сумму обеих составляющих погрешности с вероятностью  $P_0$ . Этот интервал представлен в левой части рис. 4, а, а его математическая запись имеет вид

$$P(-\Delta_X \leq \Delta x \leq \Delta_X) = P_0,$$

где  $\Delta_X$  – характеристика общей абсолютной погрешности результата измерения,  $P(\bullet)$  – вероятность события, обозначенного в скобках.

По результату  $\tilde{x}$  однократного измерения об истинном значении измеряемой величины можно заключить (см. правую часть рис. 4, а), что с этой же вероятностью оно находится в пределах  $(\tilde{x} - \Delta_X, \tilde{x} + \Delta_X)$ , то есть

$$P(\tilde{x} - \Delta_X \leq x \leq \tilde{x} + \Delta_X) = P_0.$$

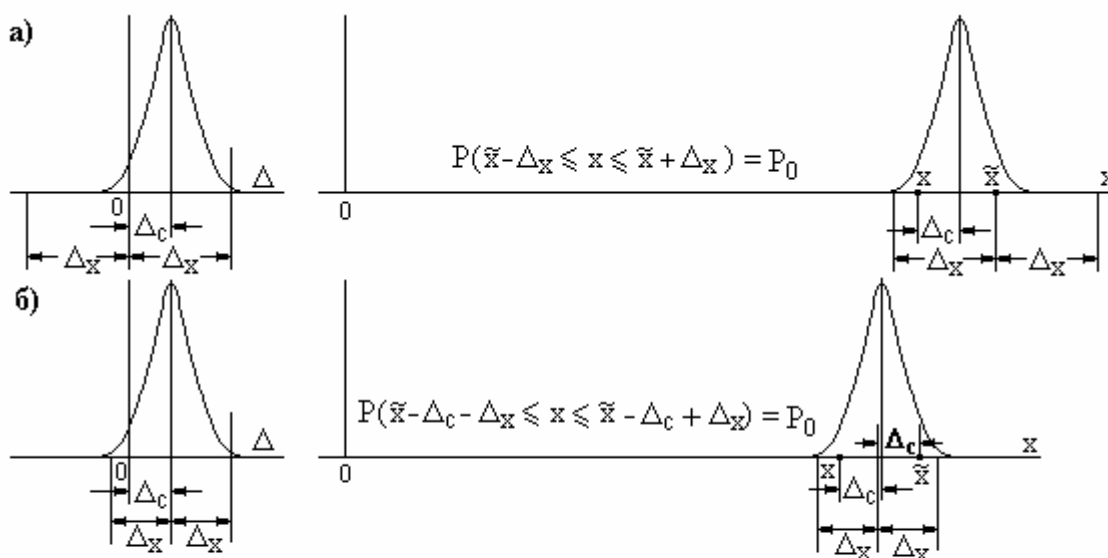


Рис. 4. Интервалы неопределенности погрешности (слева) и истинного значения измеряемой величины

Если при измерениях существует возможность определить систематическую погрешность и внести в результат поправку на нее, то интервалом неопределенности достаточно характеризовать только случайную составляющую (рис. 4, б). При этом ширина интервала, содержащего погреш-

ность, уменьшается. Интервал неопределенности истинного значения измеряемой величины определяется с помощью выражения

$$P(\tilde{x} - \Delta_c - \Delta_X \leq x \leq \tilde{x} - \Delta_c + \Delta_X) = P_0.$$

Однако точное определение систематической погрешности невозможно, и после ее исключения всегда остается неисключенная часть систематической погрешности. Если предельное значение модуля неисключенной систематической погрешности обозначить  $\Delta_c$ , то и после введения поправки на систематическую погрешность интервал неопределенности результата измерения будет определяться так, как представлено на рис. 4 а, где  $\Delta_c$  – это предельное значение модуля неисключенной систематической погрешности измерений, которое входит в характеристику  $\Delta_X$  общей погрешности измерений.

Итак, если погрешности имеют случайный характер, то этому интервалу сопоставляется вероятностная мера  $P_0$ , близкая к единице (от 0.80 до 0.95). Именно такая трактовка характеристики погрешности измерений содержится в определении термина “единство измерений” (см. введение).

Повторим еще раз, что указанная интервальная характеристика погрешности результата измерения есть не что иное, как интервальная характеристика остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

*Характеристика погрешности  $\Delta_X$  – основная характеристика качества результата измерения и остаточной неопределенности значения измеряемой величины.* Результат каждого измерения должен сопровождаться оценкой этой характеристики.

Форма выражения характеристики погрешности может быть двоякой: в виде предельного значения  $\Delta_X$  абсолютной погрешности либо предельного значения  $\gamma_x$  относительной погрешности, где  $\gamma_x = \Delta_X/x$ .

*Относительная погрешность результата измерений (relative error)* – отношение абсолютной погрешности результата измерений к истинному значению измеряемой величины. Она выражается в относительных единицах или в процентах.

Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, относительная погрешность вычисляется по отношению к результату изме-

рения. Покажем, что такая замена в большинстве случаев допустима, ибо она приводит к изменению значения погрешности на величину второго порядка малости по сравнению с погрешностью:

$$\begin{aligned} \gamma_x &= \frac{\Delta x}{\tilde{x}} = \frac{\Delta x}{x + \Delta x} = \frac{\Delta x}{x} \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right)} = \frac{\Delta x}{x} \left(1 - \frac{\Delta x}{x} + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 - \dots\right) = \\ &= \frac{\Delta x}{x} - \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \dots \approx \frac{\Delta x}{x} \end{aligned}$$

### 2.3. Правила округления при измерениях

При измерениях, выполняемых с применением современных средств вычислительной техники, результаты измерений и погрешности предъявляются пользователю с избыточным количеством цифр, что свидетельствует о следующем: измерения выполнены очень точно. Особенно ярко это проявляется при усреднении результатов многократных измерений. Предельная погрешность (неопределенность) измерений оценивается также с применением вычислительных средств.

Пусть, например, результат усреднения результатов измерений получен в виде 8,352487941, а оценка предельной погрешности 0,003567835.

Ясно, что все цифры результата, находящиеся на третьем месте после запятой и далее, недостоверны, поскольку расположены внутри зоны погрешности, ограниченной первой цифрой, находящейся также на третьем месте после запятой. Поэтому результат следует округлить до того знака (разряда), в котором появилась первая значащая цифра погрешности. В данном случае это третий знак после запятой.

Погрешность бессмысленно выражать всеми значащими цифрами, поскольку она оценивается приближенно сверху. В соответствии с действующей нормативной метрологической документацией погрешность выражается всего одной или максимум двумя значащими цифрами и должна округляться в сторону увеличения.

Поэтому в данном примере результат выражается числом 8.352, а предельная погрешность (неопределенность) этого результата – числом 0.004.



## 2.4. Основные этапы измерительных технологий

В дальнейшем будем различать прямые и косвенные измерения.

*Прямое измерение* (direct measurement) – измерение, при котором результат измерения получают непосредственно из опытных данных.

В некоторых случаях прямое измерение величин оказывается невозможным или нецелесообразным. Тогда прибегают к *косвенным измерениям*.

*Косвенное измерение* (indirect measurement) – определение искомого значения измеряемой величины путем вычислений на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной.

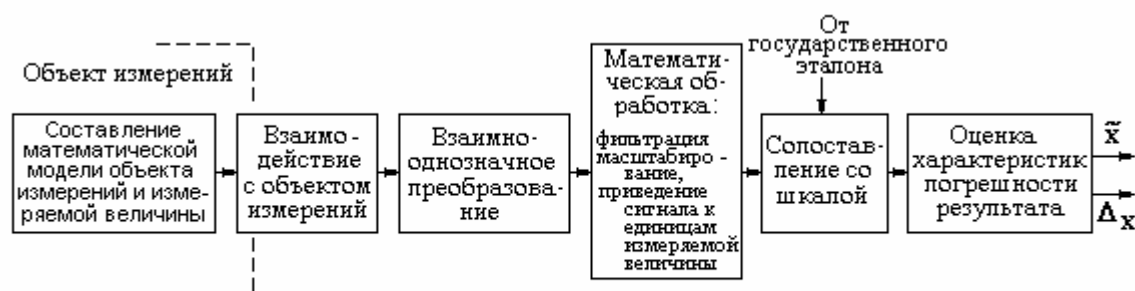


Рис. 5. Этапы прямых измерений

Первым этапом перед планированием и выполнением любой измерительной процедуры является формализация и составление модели объекта измерений и измеряемой величины (рис. 5). Так, перед измерением диаметра стержня необходимо считать его круглым цилиндром с указанием отклонений от круглости. При измерении температуры воздуха в некотором объеме необходимо представить модель распределения температуры в этом объеме и сформулировать измеряемую температуру как измеряемую величину: среднюю по объему, как минимальную, как максимальную или как температуру в какой-либо точке объема.

На следующем этапе организуется взаимодействие измерительного инструмента с объектом измерений. Этот этап является важнейшим в про-

цедуре восприятия информации от объекта. В нем сконцентрирована физическая, информационная и философская сущность измерений как познавательного процесса. Именно здесь сталкиваются две противоположные стороны любого познания: без контакта с объектом познание невозможно, но этот контакт с объектом искажает его, что приводит к потере части информации. Наиболее четкой формализацией такого дуализма является известное из квантовой механики соотношение Гейзенберга между неопределенностью импульса  $\Delta p$  и неопределенностью координаты  $\Delta x$  частицы:  $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$ , где  $h$  – постоянная Планка.

В связи с этим взаимодействие должно быть:

достаточно “деликатным” по отношению к объекту, с тем чтобы извлечь максимум информации при минимальном искажении объекта, избирательным только по отношению к измеряемой величине и нечувствительным по отношению к иным свойствам и параметрам объекта, стабильным во времени, нечувствительным к внешним мешающим факторам: климатическим, механическим и др.

Сигнал измеряемой величины, воздействующий на чувствительный элемент измерительного инструмента, порождает реакцию данного инструмента в виде сигнала измерительной информации, который должен быть связан с сигналом измеряемой величины взаимно однозначной стабильной функциональной зависимостью.

Сигнал измерительной информации, который получается в результате взаимодействия чувствительной части измерительного инструмента с объектом, обычно подвергается преобразованиям, таким как фильтрация, усиление, ослабление, нелинейному преобразованию, а также преобразованию в цифровой код в целях получения сигнала, пригодного для дальнейшей математической обработки. Все эти преобразования должны быть взаимнооднозначными, стабильными во времени, не зависящими от действия внешних мешающих факторов.

Последующая математическая обработка имеет целью приведение сигнала измерительной информации к единицам измеряемой величины и к такому размеру, чтобы обеспечить уверенное сопоставление со шкалой измеряемой величины. Эта шкала формируется в результате выполнения

специальной метрологической процедуры, связывающей ее с государственным эталоном, который хранит единицу измеряемой величины.

Обязательным заключительным этапом измерения является формирование и представление результата измерения и характеристик  $\Delta_x$  погрешности этого результата, то есть характеристик остаточной неопределенности значения измеряемой величины.

Этапы выполнения процедуры косвенных измерений представлены на рис. 6. От процедуры прямых измерений они отличаются добавлением



Рис. 6. Этапы косвенных измерений

этапа вычисления результата косвенного измерения  $\tilde{w} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$ , где  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k$  – результаты прямых измерений. Понятно, что здесь перед планированием и выполнением измерений важно составить более подробную модель объекта измерений поскольку она должна содержать те соотношения между параметрами объекта, которые будут использованы на этапе вычисления результатов косвенных измерений. И обязательно результат измерения сопровождается оценкой характеристики погрешности  $\Delta_w$ .

## 2.5. Примеры взаимодействия датчиков с объектом измерений

Объект измерения – электрическая цепь. Измерению подлежит параметр этой цепи, а именно, постоянное напряжение на ее участке, сопротивление которого равно  $R_H$  (см. рис. 7, а). Эквивалентное сопротивление остальной части цепи равно  $R_{Ц}$ . Истинное значение измеряемого напряжения, которое было на сопротивлении  $R_H$  до подключения вольтметра, рав-

но  $U_X$ . Средство измерений – стрелочный вольтметр, собственное сопротивление которого указано в его технической документации. Для расчета эффекта, производимого взаимодействием, будем считать, что инструментальная погрешность вольтметра равна нулю.

$$U_X = E \frac{R_H}{R_H + R_{Ц}}, \quad \tilde{U} = E \frac{R_H R_B}{R_H R_B + R_H R_{Ц} + R_B R_{Ц}},$$

$$\Delta U = \tilde{U} - U_X = -E \frac{R_H^2 R_{Ц}}{(R_H R_B + R_H R_{Ц} + R_B R_{Ц})(R_H + R_{Ц})}.$$

В этих формулах  $\tilde{U}$  – напряжение, которое образуется после подключения вольтметра и оказывается меньше исходного истинного напряжения в силу шунтирования этого участка цепи сопротивлением вольтметра. Общий ток в цепи увеличивается на значение тока, потребляемого вольтметром, и тем самым объект измерений изменяется. В результате этого влияния возникает систематическая погрешность, обозначенная здесь через  $\Delta U$ . По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{\tilde{U}} = - \frac{R_H R_{Ц}}{(R_H + R_{Ц})} \cdot \frac{1}{R_B}. \quad (1)$$

Умножив числитель и знаменатель выражения (1) на  $(\tilde{U}^2)$ , увидим, что относительная погрешность, вызванная взаимодействием вольтметра и цепи, равна отношению энергий, то есть частному от деления энергии, потребляемой вольтметром, на энергию, рассеиваемую объектом:

$$\gamma_U = - \frac{R_H R_{Ц}}{(R_H + R_{Ц})(\tilde{U})^2} \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} = - \frac{(\tilde{U})^2}{R_B} : \frac{(\tilde{U})^2}{R_{ЦВ}},$$

где  $R_{ЦВ}$  – сопротивление, “видимое” со стороны вольтметра и равное сопротивлению, образованному параллельным соединением сопротивления нагрузки  $R_H$  и сопротивления цепи  $R_{Ц}$ .

В данном случае эта погрешность может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Остаточная погрешность будет опреде-

ляться точностью, с которой известны значения величин, входящих в выражение для  $\Delta U$ .

В соответствии с определением, приведенным в разд. 1.2, сопротивление вольтметра  $R_B$  есть одна из его метрологических характеристик, поскольку оказывает влияние на погрешность результата измерений.

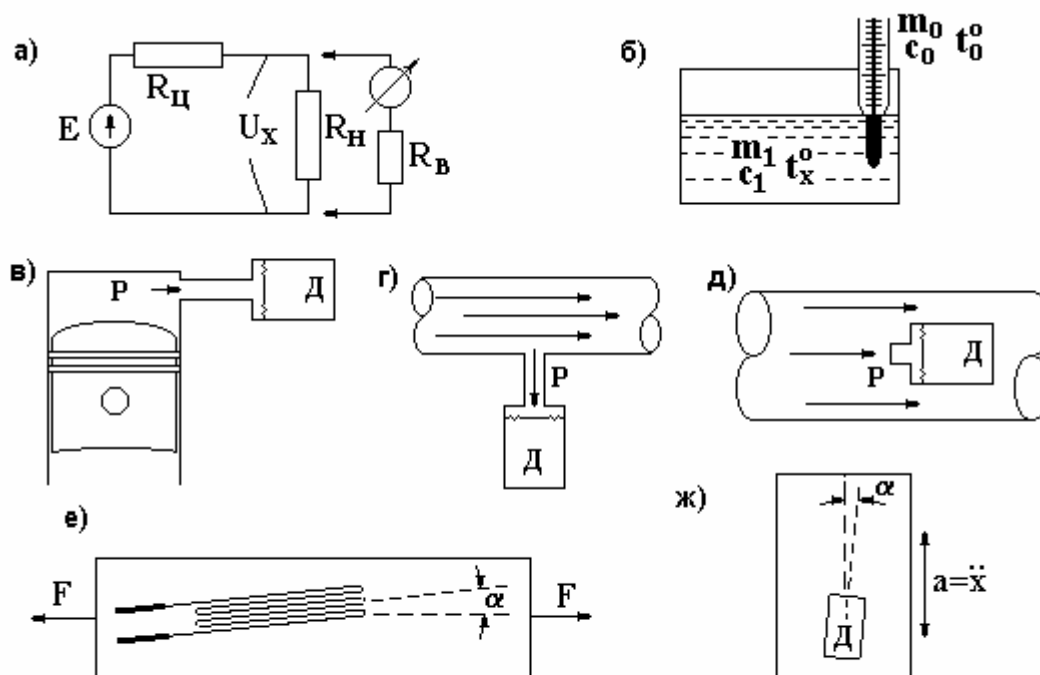


Рис. 7. Примеры взаимодействия средств измерений с объектом измерений

Объект измерения – перемешиваемая жидкость в сосуде (рис. 7, б). Измерению подлежит параметр объекта: температура жидкости. Масса жидкости –  $m_1$ , удельная теплоемкость –  $c_1$ , истинная температура –  $t_x^0$ . Средство измерений – ртутный термометр, который будем считать абсолютно точным. Его масса –  $m_0$ , удельная теплоемкость погружаемой части –  $c_0$ . Собственная температура термометра до его погружения в жидкость равна  $t_0^0$ , ее значение может быть считано со шкалы. Считаем, что теплообмена с внешней средой нет.

В таком случае общее количество теплоты сохраняется неизменным, и уравнение теплового баланса имеет вид:

$$t_0^0 m_0 c_0 + t_x^0 m_1 c_1 = \tilde{t}^0 (m_0 c_0 + m_1 c_1),$$

где  $\tilde{t}^0$  - результат измерения установившейся температуры жидкости, а, следовательно, и погружаемой части термометра.

Понятно, что если температура термометра была ниже истинной температуры жидкости, температура жидкости снизится и наоборот поднимется в противном случае. В результате такого взаимодействия термометра с объектом (жидкостью) возникает систематическая погрешность

$$\Delta t^0 = \tilde{t}^0 - t_x^0 = -\frac{m_0 c_0}{m_0 c_0 + m_1 c_1} (t_x^0 - t_0^0).$$

По отношению к результату измерения эта погрешность вычисляется по формуле

$$\gamma_t = \frac{\Delta t^0}{\tilde{t}^0} = -\frac{m_0 c_0 (t_x^0 - t_0^0)}{t_0^0 m_0 c_0 + t_x^0 m_1 c_1} = -\frac{Q_{\text{ТЕРМ}}}{Q_{\Sigma}},$$

то есть относительная погрешность измерения температуры, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом, равна частному от деления количества теплоты (то есть энергии), необходимой для нагревания (или охлаждения) термометра до измеряемой температуры, на количество общей теплоты, содержащейся в объекте и термометре.

В данном случае эта погрешность систематическая и может быть почти полностью исключена путем введения поправки. Неисключенный остаток погрешности будет определяться точностью, с которой известны величины, входящие в формулу для  $t_x^0$ .

В соответствии с определением, приведенным в разделе 1.2, масса и теплоемкость погружаемой части ртутного термометра являются его метрологическими характеристиками, поскольку оказывают влияние на погрешность результата измерений.

Объект измерения – цилиндр двигателя внутреннего сгорания (рис. 7, в). Параметр, подлежащий измерению – давление газов внутри цилиндра. Присоединение датчика Д с помощью трубки приводит к увеличению объема камеры сгорания и тем самым к уменьшению давления, поскольку произведение давления на объем должно быть примерно постоян-

ным. Это означает, что объект изменился. Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической.

Объект измерения – трубопровод с потоком жидкости или газа (рис. 7 г, д). Параметр, подлежащий измерению – давление транспортируемого вещества. В одном случае (рис. 7, г) погрешность, вызванная нежелательным взаимодействием, будет отрицательной, в другом (рис. 7, д) – положительной.

Объект измерения – механическая конструкция. Параметр, подлежащий измерению, – деформация участка конструкции. Средство измерений (датчик) – проволочный тензорезистор. Принцип действия – изменение сопротивления проволоки, из которой изготовлен датчик, при его деформации в пределах упругости. Для передачи деформации от объекта к датчику он приклеивается к объекту специальным неэластичным клеем (рис. 7, е). Погрешность от взаимодействия будет вызвана:

- неудовлетворительным качеством приклеивания датчика;
- увеличением жесткости объекта за счет приклеивания к нему датчика;
- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемой деформации.

Погрешность, возникающая при этом взаимодействии датчика с объектом, будет систематической, отрицательной.

Объект измерения – транспортное средство, механическая конструкция, строительное сооружение. Параметр, подлежащий измерению, – ускорение вибраций в заданной точке. Средство измерений – датчик ускорения, жестко устанавливаемый на объекте (рис. 7, ж). Погрешность будет вызвана:

- недостаточной жесткостью крепления датчика к объекту, вследствие чего ускорение виброперемещений объекта передается к датчику не полностью;

- увеличением массы объекта на величину массы датчика, вследствие чего изменяется частота собственных колебаний объекта и амплитуда виброускорений;

- неточным позиционированием датчика в направлении измеряемых ускорений.

Для ограничения разброса жесткости крепления датчика ускорений к объекту в технической документации на подобные датчики должно быть приведено значение усилия завинчивания крепящих винтов (при винтовом креплении). Обеспечение заданного усилия крепления датчика осуществляется за счет применения динамометра либо ключей, снабженных устройством дозирования усилия.

Для оценки степени влияния массы датчика на объект измерений в технической документации должно быть приведено значение массы датчика с указанием пределов допускаемых отклонений от номинального значения, как одной из метрологических характеристик, обуславливающих степень взаимодействия с объектом и соответствующую погрешность.



### **3. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Цели составления метрологических структурных схем измерительных каналов:

анализ причин возникновения погрешности результата измерений  
получение расчетных формул для оценки характеристик погрешности результатов измерений.

В данной главе рассмотрены метрологические структурные схемы измерений, выполняемых измерительными каналами измерительных информационных систем в статическом и динамическом режимах. В этих схемах одним элементом обозначены все последовательные аналоговые преобразования сигналов измерительной информации. Также одним элементом представлены цифровые преобразования сигнала измерительной информации к единицам измеряемой величины. В число таких преобразований (чаще всего это математическая обработка данных в компьютере) может входить фильтрация сигнала или линеаризация характеристики датчика. Только после проведения таких процедур выходной сигнал можно сопоставить с принятой шкалой измеряемой величины.

В дальнейшем будут рассмотрены два режима измерений: статический режим и динамический.

*Статический режим измерений* – режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины и

инерционностью средств измерений, пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

*Динамический режим измерений* – режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины, существенны по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

### 3.1. Статический режим измерений, прямые измерения

#### 3.1.1. Общая метрологическая структурная схема

На рис. 8. приведена метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме для общего случая применения нелинейных средств измерений.

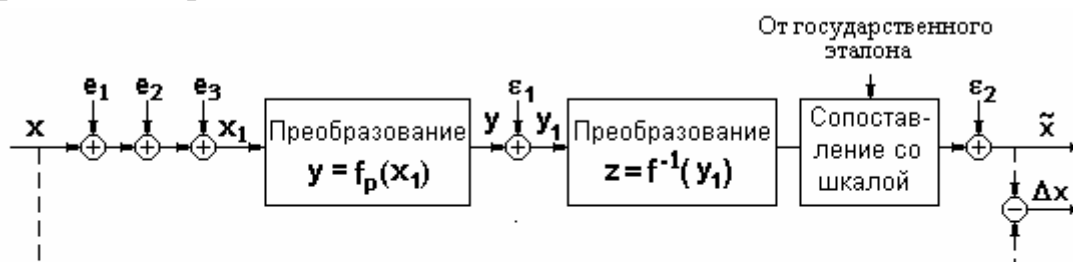


Рис. 8. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме

Данная схема пригодна для анализа измерений, выполняемых как аналоговыми, так и цифровыми средствами измерений в статическом режиме, в том числе, отдельными измерительными каналами ИИС,

На рис. 8 обозначено:

$x$  – истинное значение измеряемой величины,

$e_1$  – погрешность, вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям (см. также раздел 2.1),

$e_2$  – погрешность, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом (см. раздел 2.2),

$\varepsilon_3$  – погрешность, вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами,

$y = f_p(x)$  – реальная фактическая функция преобразования конкретного экземпляра средства измерения,

$y = f(x)$  – номинальная функция преобразования, декларированная для средств измерений данного типа,

$x = f^{-1}(y)$  – функция, обратная функции  $y = f(x)$ ,

$\varepsilon_1$  – собственная погрешность преобразования средства измерения, вызванная дрейфом выходного сигнала преобразователя, собственными тепловыми шумами и помехами,

$\varepsilon_2$  – погрешность, состоящая из погрешности реализации обратной функции  $x = f^{-1}(y)$ , погрешности воспроизведения шкалы и погрешности сопоставления со шкалой, в том числе это погрешности округления, выполняемого оператором при отсчете показаний аналогового прибора или вызванного конечной разрядностью цифрового прибора или аналого-цифрового преобразователя,

$\tilde{x}$  – результат прямого измерения величины  $x$ ,

$\Delta x$  – погрешность результата измерения,  $\Delta x = \tilde{x} - x$ .

Различие между функциями  $y = f_p(x)$  и  $y = f(x)$  вызвано неточностью воспроизведения функции  $y = f_p(x)$  из-за погрешностей изгото-

товления и старения комплектующих изделий, из-за воздействия внешних влияющих факторов, а также из-за разброса на множестве экземпляров средств измерений. Разность между этими функциями обозначим  $\Delta f(x) = f_p(x) - f(x)$ . Такая разность случайна на множестве экземпляров средств измерений одного типа, и в целях обеспечения надлежащего метрологического качества должна быть ограничена пределами допустимых

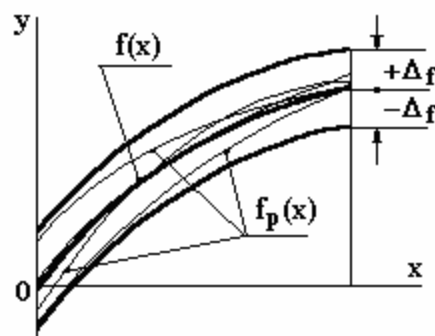


Рис. 9. Пример области допустимого разброса функций преобразования средств измерений одного типа

различий  $(-\Delta_f, +\Delta_f)$  между этими функциями для всех значений измеряемой величины из диапазона измерения:

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f. \quad (2)$$

Неравенство (2) ограничивает область, в которой должны находиться функции преобразования всех средств измерений, признаваемых пригодными к применению. Пример такой области представлен на рис. 9.

Значение  $\Delta_f$  должно быть указано в технической документации на средство измерений.

Естественными требованиями, предъявляемыми к функциям преобразования средств измерений, являются требования монотонности (а следовательно, взаимной однозначности преобразования) и гладкости, то есть ограниченности модуля производных. Однако, производная функции преобразования – это *чувствительность* средства измерений:

$$S = df_p(x)/dx \cong df(x)/dx.$$

Близость производных функций  $y = f_p(x)$  и  $y = f(x)$  можно выразить неравенством

$$\left| \frac{f'_p(x)}{f'(x)} - 1 \right| \leq \delta$$

где  $\delta > 0$  и имеет один порядок величины с собственной относительной погрешностью средства измерений.

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим

$$e = e_1 + e_2 + e_3.$$

Тогда, используя схему, представленную на рис. 8, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого подобным средством:

$$\Delta x = f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) = \Delta x + x - \varepsilon_2. \quad (3)$$

В силу монотонности функции  $f(x)$  выражение (3) равносильно следующему:

$$f_p(x + e) + \varepsilon_1 = f(x + \Delta x - \varepsilon_2),$$

Применим разложение функций в степенной ряд относительно точки  $x$  и, воспользовавшись малостью погрешностей, оставим только первые и линейные члены этих рядов. Тогда после перегруппировки слагаемых получим:

$$f'(x)\Delta x = f_p(x) - f(x) + f'_p(x)e + f'(x)\varepsilon_2 + \varepsilon_1. \quad (4)$$

Производная  $f'(x)$  номинальной функции, то есть чувствительность средства измерений, не должна быть равна нулю, поэтому можно разделить обе части равенства (4) на  $f'(x)$ :

$$\Delta x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \varepsilon + e, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2$  - собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений.

Первое и второе слагаемые, находящиеся в правой части равенства (5), порождены собственными свойствами средства измерений, поэтому сумма

$$\Delta_{\text{инст}}x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2 \quad (6)$$

называется *инструментальной составляющей абсолютной погрешности* или *инструментальной погрешностью*. При выпуске средства измерений из производства, при его транспортировании, хранении и эксплуатации инструментальная погрешность не должна превышать (может быть, с некоторой вероятностью) некоторого заранее установленного значения, то есть нормы  $\Delta_x$ . Значение нормы  $\Delta_x$  погрешности  $\Delta_{\text{инст}}x$ , устанавливается при проектировании средства измерений и сообщается пользователю в сопроводительной технической документации. Процесс установления нормы на инструментальную погрешность называется *нормированием характеристики инструментальной погрешности средства измерений*. Норма погрешности  $\Delta_x$  в соответствии с определением, приведенным в разд. 2.1, является метрологической характеристикой средства измерений. Ответственность за инструментальную погрешность несет разработчик и производитель средства измерений.

Слагаемое  $e$  в правой части равенства (5) порождено причинами, возникающими при применении средства измерений, а именно взаимодействием с объектом, неадекватностью принятых математических моделей измеряемой величины и объекта, пульсациями и помехами, источником которых является объект. Это слагаемое составляет *различие между погрешностями средства измерений и погрешностями результата измерений*, и за него несут ответственность пользователи средства измерений. Поэтому далее погрешность  $e = e_1 + e_2 + e_3$  будем называть *погрешностью применения* средства измерений. Оценку характеристики погрешности применения для конкретных условий выполняет пользователь средства измерений. Норма на эту погрешность, как правило, не устанавливается.

Как отмечено ранее, значение погрешности результата каждого измерения не может быть определено, поэтому на практике используются оценки интервальных характеристик погрешности. Исходными данными для расчета характеристики абсолютной погрешности результата измерений в виде границ интервала неопределенности  $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$  могут быть только предельно допускаемые значения  $\Delta_f$  и  $\Delta_\varepsilon$  составляющих абсолютной инструментальной погрешности, которые должны быть сообщены пользователю в технической документации на средство измерений. Гарантии в отношении сохранности этих характеристик обеспечивает изготовитель средства измерений и контролирующие метрологические органы. Предельно возможные границы  $(-\Delta_e, +\Delta_e)$  погрешности  $e$  определяются пользователем в соответствии с конкретными условиями измерений.

Итак, если исходные данные известны, то есть, если известно (может быть, с некоторой вероятностью), что

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f, \quad |\varepsilon| = \left| \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon \right| \leq \Delta_\varepsilon, \quad |e| \leq \Delta_e,$$

то на основании равенства (6) об абсолютной погрешности результата измерений можно заключить, что ее значения не должны выходить за пределы, которые определяются неравенством

$$|\Delta x| \leq \frac{\Delta_f}{f'(\tilde{x})} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (7)$$

Таким образом границы интервала остаточной неопределенности значения измеряемой величины суть  $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$ , где

$$\Delta_x = \frac{\Delta_f}{f'(\tilde{x})} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon,$$

$\tilde{x}$  – результат измерения.

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой величины, лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах  $(-\Delta_{\text{инст}}, +\Delta_{\text{инст}})$ , где

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\Delta_f}{f'(\tilde{x})} + \Delta_\varepsilon. \quad (8)$$

В рассмотренном общем случае удобно устанавливать норму  $\gamma_{\text{отн}}$  на относительную инструментальную погрешность средства измерений или норму  $\gamma_{\text{прив}}$  на приведенную инструментальную погрешность, отнесенную к наибольшему значению измеряемой величины в диапазоне измерения. Такие нормы выражаются в процентах:

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}} x}{\tilde{x}} \right| 100\% \leq \frac{\Delta_{\text{инст}}}{\tilde{x}} 100\% = \frac{\Delta_f}{\tilde{x} \cdot f'(\tilde{x})} 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{\tilde{x}} 100\% = \gamma_{\text{отн}},$$

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}} x}{x_{\text{max}}} \right| 100\% \leq \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x_{\text{max}}} 100\% = \frac{\Delta_f}{x_{\text{max}} \cdot f'(x)} 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\text{max}}} 100\% = \gamma_{\text{прив}}.$$

### 3.1.2. Примеры погрешности применения средства измерений

**Пример 1.** Погрешность  $e_1$ , вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям.

Объект измерения – стержень с неровными краями. При постановке задачи измерения длины такого стержня рассматриваемая погрешность определяется неровностью его краев вне зависимости от точности применяемого средства измерений. Варианты корректной постановки задачи измерения:

- измерить среднюю длину стержня,
- измерить минимальную (или максимальную) длину.

Аналогичная ситуация возникает, например, при измерении высоты облаков над уровнем земли или уровня воды в парогенераторе тепловой или атомной электростанции. Для корректной постановки задачи измерений в этих случаях необходимо определить математическую модель границы облаков и уровня земли или границы между водой и перегретым паром. В противном случае результат измерений будет содержать неопределенность, равную неопределенности математического определения указанных границ и уровней.

*Объект измерения – вал.* Сечение вала идеальным кругом не является. При постановке задачи измерения диаметра поперечного сечения такого вала рассматриваемая погрешность определяется отличием формы поперечного сечения от круговой вне зависимости от точности применяемого средства измерений.

*Объект измерения – помещение.* При трактовке результата измерения температуры в одной точке как температуры воздуха в данном помещении возникает погрешность, равная разности между максимальной и минимальной температурами, вне зависимости от точности применяемого термометра. Варианты корректной постановки задачи измерений:

- измерить температуру воздуха в конкретной точке,
- измерить минимальную (или максимальную) температуру воздуха в помещении,
- измерить среднюю температуру воздуха в помещении.

*Объект измерения – акватория Ладожского озера.* Задача – измерение концентрации загрязнений воды (токсичных веществ, или нефтепродуктов, или ионов тяжелых металлов и т. д.). Ситуация аналогична предыдущей. Если результат количественного химического анализа пробы, изъятый в одном месте, распространяется на всю акваторию, рассматриваемая погрешность будет определяться неравномерностью содержания исследуемого загрязнения по всему озеру, каким бы точным не был этот конкретный анализ,

*Пример 2. Погрешность  $e_2$ , вызванная взаимодействием средства измерений с объектом.*

Примеры этой составляющей погрешности применения приведены выше в разделе 2.5.



**Пример 3.** Погрешность  $e_3$ , вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами.

Эта погрешность возникает при измерении среднего значения пульсирующего давления, среднего значения выпрямленного переменного напряжения, при измерении малых напряжений в условиях действия помех, а также при преобразовании слабых сигналов измерительной информации, например выходных сигналов датчиков в условиях энергоемкого промышленного производства.

### 3.1.3. Частная метрологическая структурная схема.

#### Измерительный канал линейный

Метрологическая схема измерений существенно упрощается (рис. 10).

Поскольку  $f_p(x) = K_p x$ ,  $f(x) = Kx$ ,  $f'_p(x) = K_p$ ,  $f'(x) = K$ ,

$\Delta f(x) = f_p(x) - f(x) = K_p x - Kx = \Delta Kx$ , выражение (5) для абсолютной погрешности результата измерений приобретает вид

$$\Delta x = \frac{\Delta K}{K} x + e + \varepsilon, \quad (9)$$

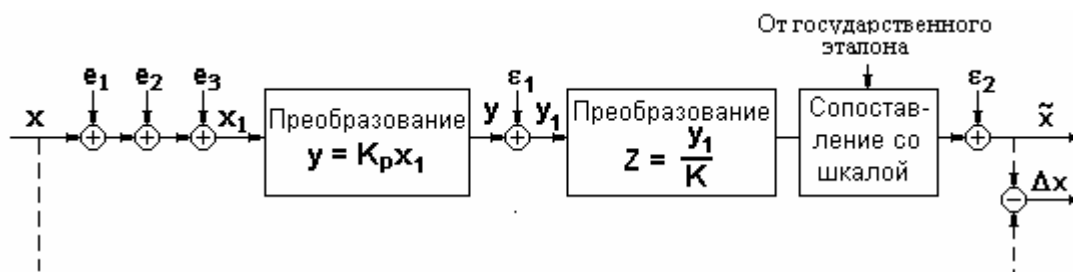


Рис. 10. Метрологическая структурная схема прямых измерений.  
Средство измерений линейное

где  $\Delta K = K_p - K$  – абсолютная погрешность коэффициента преобразования, вызванная разбросом его значений на множестве средств измерений данного типа,  $e$  – погрешность, возникающая при применении средства измерений,  $\varepsilon$  – собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений (инструментальная абсолютная аддитивная погрешность)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon}{K} + \varepsilon .$$

Первое слагаемое равенства (9) линейно зависит от измеряемой величины и представляет собой произведение относительной погрешности коэффициента преобразования на значение измеряемой величины. Поэтому данная составляющая погрешности называется *мультипликативной составляющей погрешности* или *мультипликативной погрешностью*.

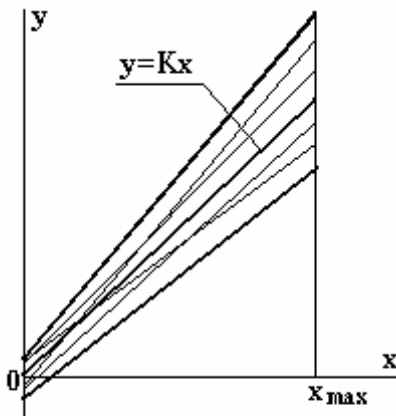


Рис. 11. Пример разброса функций преобразования линейных средств измерений

Второе и третье слагаемые не зависят от измеряемой величины, в сумме эти слагаемые образуют *аддитивную составляющую погрешности* или *аддитивную погрешность результата измерений*. Последнее слагаемое порождено собственными свойствами средства измерений является *аддитивной погрешностью средства измерений*. Точно так же исключительно свойствами средства измерений порождена мультипликативная составляющая погрешности (9). В связи с этим, как было отмечено в разделе 3.1.1, *инструментальная составляющая абсолютной погрешности* или *инструментальная погрешность*

*инструментальная погрешность*

$$\Delta_{\text{инст}} x = \frac{\Delta K}{K} x + \frac{\varepsilon}{K} + \varepsilon \quad (10)$$

Характеристикой разброса коэффициентов преобразования на множестве средств измерений одного типа является предельное допусаемое значение  $\Delta_K$ , такое, что:

$$|K_p - K| = |\Delta K| \leq \Delta_K . \quad (11)$$

При выполнении условия (11) разброс функций преобразования подобных средств измерений на множестве однотипных экземпляров будет иметь вид, показанный на рис. 11.

Границы интервала погрешности – расходящиеся прямые линии (см. рис. 11). В самом деле, используя обозначения предельных значений составляющих погрешности, введенные в разделе 3.1.1, получим линейное

выражение для границ интервала  $(-\Delta_x, +\Delta_x)$ , содержащего (может быть, с некоторой вероятностью) значение абсолютной погрешности результата измерений:

$$\Delta_x \leq \frac{\Delta_K}{K} x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \quad \text{где}$$

$\Delta_\varepsilon$  - предельное значение аддитивной

погрешности: 
$$\left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon.$$

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах  $(-\Delta_{\text{инст}}, +\Delta_{\text{инст}})$ , где

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\Delta_K}{K} |x| + \Delta_\varepsilon. \quad (12)$$

Предельное значение  $\gamma_x$  относительной погрешности результата измерений выражается формулой

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| \leq \gamma_x = \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} + \frac{\Delta_e}{x},$$

правая часть которой есть сумма предельно допускаемых относительных погрешностей коэффициента преобразования  $K$ , аддитивной погрешности  $\varepsilon$  и погрешности применения  $e$ .

Здесь характеристика относительной мультипликативной составляющей уже не зависит от измеряемой величины и равна предельному значению относительной погрешности коэффициента преобразования  $\gamma_K = \frac{\Delta_K}{K}$ .

Аддитивные составляющие содержат значение измеряемой величины в знаменателе, а это значит, что относительная погрешность результатов измерения увеличивается при уменьшении значений измеряемой величины.

Соответствующая область возможных значений абсолютной погрешности измерений показана в верхней части рис. 12, где  $x_{\text{max}}$  – верхний

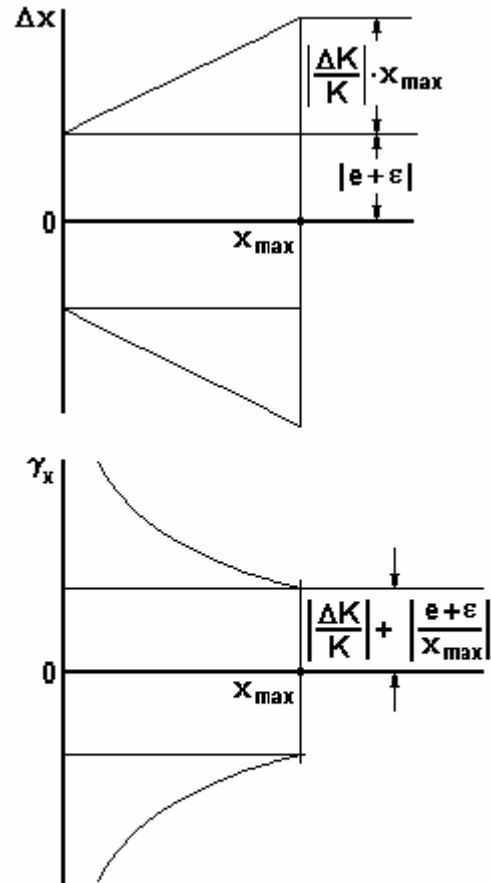


Рис. 12. Характеристики погрешности измерений

предел диапазона измерения. В нижней части рис. 12 показана область возможных значений относительной погрешности.

В рассмотренном случае нормы на две составляющие инструментальной погрешности обычно устанавливают отдельно: на относительную погрешность коэффициента преобразования и на аддитивную составляющую погрешности средства измерений. Именно так нормируется инструментальная погрешность линейных средств измерений в зарубежной практике:

норма  $\gamma_{жс}$  устанавливается на относительную погрешность коэффициента преобразования в процентах (gain error):

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| 100\% \leq \gamma_K \quad (13)$$

норма  $\Delta_\varepsilon$  устанавливается на абсолютное значение аддитивной погрешности в единицах измеряемой величины (offset error):

$$\left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon.$$

В отечественной практике применяется иное нормирование инструментальной погрешности линейных средств измерений: нормируется относительная инструментальная погрешность средства измерений с помощью двучленной формулы (вывод двучленной формулы см. далее в разд. 3.5.2):

$$\left| \frac{\Delta_{инст}}{x} \right| 100\% \leq c + d \left( \left| \frac{x_{max}}{x} \right| - 1 \right), \quad (14)$$

где  $x_{max}$  – максимальное значение измеряемой величины в диапазоне измерения,  $x$  – истинное значение измеряемой величины, на практике вместо него используется результат измерения,

$$d = \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{max}} \right| 100\%, \quad c = \left( \left| \frac{\Delta_K}{K} \right| 100\% + d \right). \quad (17)$$

Раскрывая скобки в (16) с учетом обозначений (17), получим ограничение, накладываемое этой формулой на относительную инструментальную погрешность средства измерений:

$$\left| \frac{\Delta_{инст}}{x} \right| 100\% \leq \left| \frac{\Delta_K}{K} \right| 100\% + \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x} \right| 100\%,$$

что согласуется с (13). Сравнение зарубежных и отечественных методов нормирования показывает, что при отечественном нормировании пользователю предоставляется более наглядная и полная информация об инструментальной погрешности средства измерений.

### 3.1.4. Частная метрологическая структурная схема.

#### Отличие функции преобразования измерительного канала от линейной незначительно

Ранее в разделе 3.1.3 был рассмотрен идеализированный случай линейного средства измерений. Однако в большинстве случаев, несмотря на стремление добиться линейной функции преобразования, все-таки незначительная нелинейность у многих средств измерений остается. Тем не менее, если это целесообразно, подобные средства измерений декларируются

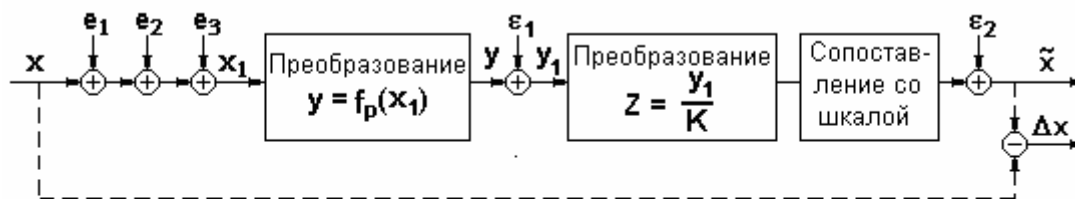


Рис. 13. Метрологическая структурная схема прямых измерений. средство измерений незначительно отличается от линейного.

в рекламной и сопроводительной документации, как линейные, а остаточная нелинейность входит в состав инструментальной погрешности. Рассмотрим описанную ситуацию с помощью метрологической структурной схемы (рис. 13). Эта схема отличается от схемы, представленной на рис. 10, лишь первой операцией.

Реальные функции  $y = f_p(x_1)$  нелинейного преобразования измеряемой величины, возмущенной погрешностями  $e = e_1 + e_2 + e_3$  (то есть погрешностями применения) отличаются от линейной функции  $y = Kx_1$  незначительно, так, что модуль разности между ними при всех значениях

измеряемой величины из диапазона измерений не превосходит некоторого значения  $\Delta_f$ , которое составляет лишь часть общей инструментальной погрешности:

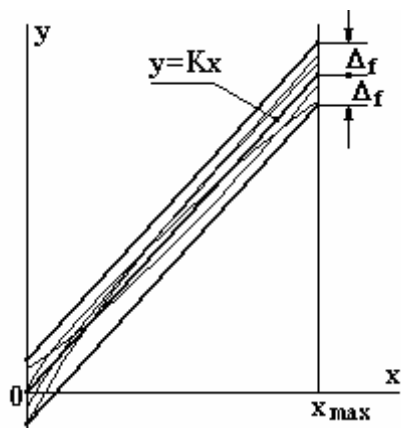


Рис. 14. Пример разброса функций преобразования внутри допустимых пределов

$$|f_p(x_1) - Kx_1| \leq \Delta_f,$$

где  $K$  – номинальный коэффициент преобразования, объявленный в документации.

Зона, в которой должны находиться реальные функции преобразования, представлена на рис. 14. Эта зона порождена погрешностями воспроизведения функции преобразования из-за неточности изготовления и старения комплектующих изделий, ее изменением под воздействием внешних влияющих факторов, а также разбросом на множестве экземпляров средств измерений.

ний.

Применяя к рассматриваемому случаю обозначения, использованные в (5), получим равенство для абсолютной погрешности измерения:

$$\Delta x = \frac{f_p(x+e) - Kx}{K} + \varepsilon = \frac{f_p(x+e) - K(x+e)}{K} + e + \varepsilon.$$

По аналогии с неравенством (7) и с теми же обозначениями устанавливаются граничные значения для абсолютной погрешности:

$$|\Delta x| \leq \frac{|\Delta_f|}{K} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (16)$$

Как видим, в этом случае, как и в разделе 3.1.1, мультипликативная составляющая погрешности не выделяется. В силу непредсказуемого различия реальных функций преобразования  $y$  различных экземпляров средств измерений здесь вся погрешность считается аддитивной, и максимально возможное или допустимое значение правой части неравенства (16) принимается в качестве предельного значения погрешности измерений во всем диапазоне измерений.

Простым делением обеих частей неравенства (16) на  $x$  получаем выражение для пределов допускаемой относительной погрешности:

$$|\gamma_x| \leq \frac{|\Delta_f|}{Kx} + \frac{\Delta_e}{x} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x}.$$

Для средств измерений с незначительной нелинейностью нормируется приведенная погрешность, то есть абсолютная погрешность, отнесенная к максимальному значению измеряемой величины в диапазоне измерения:

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x_{\text{max}}} \right| 100\% \leq \left| \frac{\Delta_f}{Kx_{\text{max}}} \right| 100\% + \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\text{max}}} \right| = \gamma_{\text{прив}}$$

## 3.2. Динамический режим измерений, прямые измерения

### 3.2.1. Применяемые средства измерений

Номенклатура средств измерений, применяемых для измерения мгновенных значений изменяющейся во времени измеряемой величины, ограничена. Стрелочные приборы или иные приборы, снабженные индикаторами (такие, например, как ртутные термометры), в силу своей инерционности и длительности визуального отсчитывания показаний не позволяют измерять значения величин, изменяющихся во времени с заметной скоростью. То же самое относится к цифровым приборам, на входе которых может находиться инерционный аналоговый преобразователь, например, фильтр или интегратор, а для визуального считывания показаний цифрового прибора и их записи необходимо значительное время.

По этим причинам для измерения мгновенных значений изменяющихся измеряемых величин применяются следующие средства измерений:

аналоговые регистрирующие приборы с непрерывной или дискретной записью результатов,

быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) в комплекте с устройствами памяти (например, сопряженные с процессором или с компьютером), в которые записывается каждый полученный результат,

измерительные информационные системы, каждый измерительный канал которых, по сути, выполняет функции аналогового и последующего

аналого-цифрового преобразования измеряемой величины с записью результатов в память компьютера, при выводе этих результатов на дисплей в реальном времени такие каналы, по сути, являются цифровыми осциллографами.

Корректный метрологический анализ погрешностей измерения изменяющихся величин возможен при условии, что в применяемых средствах измерений выполняются *линейные преобразования измеряемой величины*. В этом случае для анализа погрешностей могут использоваться частотные методы, аппарат передаточных функций и интегральных операторов типа свертки. Измеряемые величины, погрешности и помехи на метрологических структурных схемах представляются, как функции времени.

### **3.2.2. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины**

Преобразование изменяющихся во времени величин (далее – сигналов), выполняемое физическими устройствами, приводит к искажению формы сигналов вследствие того, что частотная характеристика любого физически реализуемого преобразователя неравномерна. Это означает, что коэффициенты преобразования различных гармонических составляющих входного сигнала различны. С увеличением частоты коэффициент преобразования в итоге уменьшается вплоть до нуля. Во временной области процесс преобразования описывается интегральным оператором типа свертки, который при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y(t) = \int_0^t k(t-\tau)x_1(\tau)d\tau, \quad (17)$$

где  $k(t-\tau)$  – ядро оператора, а в теории измерений и автоматического управления – *импульсная переходная функция* или *весовая функция*. Это преобразование показано на метрологической структурной схеме рис. 15, где использованы все обозначения, принятые ранее в разделе 3.1.1. Индекс ‘р’ у обозначения импульсной переходной функции означает, что в составе конкретного экземпляра средства измерений используется реальный преобразователь. Характеристики реальных преобразователей на множестве всех экземпляров имеют разброс, вызванный теми же причинами, которые



перечислены выше в разделе 3.1.1 в отношении реального коэффициента преобразования.

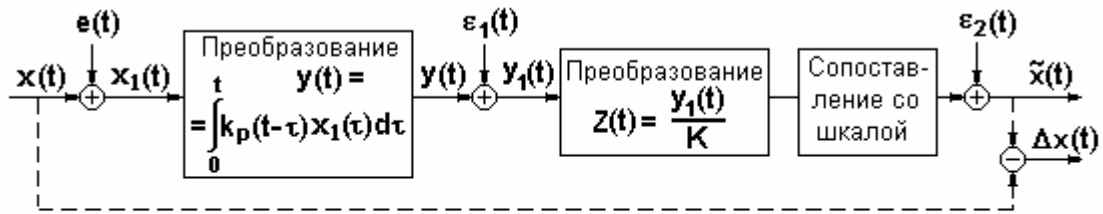


Рис. 15. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное аналоговое

Отличие настоящей схемы от предыдущих состоит лишь в том, что в данной схеме все величины зависят от времени, а погрешности применения, действующие на входе средства измерений, обозначены единым символом  $e(t)$ .

Сигнал, полученный в итоге первого преобразования, подвергается масштабированию с коэффициентом  $K$ , принятым в качестве номинального для данного средства измерений. После этого выполняется сопоставление со шкалой и регистрация значений измеряемой величины на носителе информации (диаграммной ленте, фотопленке, магнитной пленке и т.п.) в единицах ее измерения. В ходе неизбежной расшифровки полученной непрерывной записи результатами измерений оказываются дискретные значения, а в состав погрешности  $\varepsilon_2$  входит погрешность расшифровки.

В соответствии с приведенной схемой (рис. 15) погрешность прямого измерения мгновенных значений изменяющейся измеряемой величины может быть записана в виде равенства

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \left[ \int_0^t k_p(t-\tau)x(\tau)d\tau \right] + \frac{1}{K} \int_0^t k_p(t-\tau)e(\tau)d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t) - x(t),$$

Откуда

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \left[ \int_0^t k_p(t-\tau)x(\tau)d\tau - Kx(t) \right] + \frac{1}{K} \int_0^t k_p(t-\tau)e(\tau)d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t) \quad (18)$$

Применяя к равенству (18) преобразование Фурье, получим выражение для комплексного спектра погрешности измерения через спектры сиг-

налов и реальную комплексную частотную характеристику преобразователя  $K_p(j\omega)$ :

$$\Delta x(j\omega) = \frac{1}{K} [K_p(j\omega) - K] x(j\omega) + \frac{K_p(j\omega)}{K} e(j\omega) + \frac{\varepsilon_1(j\omega)}{K} + \varepsilon_2(j\omega), \quad (19)$$

где частотные характеристики суть преобразования Фурье соответствующих импульсных переходных характеристик:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-j\omega t} dt, \quad K_p(j\omega) = \int_0^{\infty} k_p(t) e^{-j\omega t} dt$$

Как видно, структура правой части равенств (18) и (19) аналогична структуре правых частей равенств (5), (6). Мало того, равенство (5) есть частный случай (18) и (19), поскольку при неизменной во времени измеряемой величине (или неизменном сигнале измерительной информации), то есть при  $\omega = 0$

$$K(0) = \int_0^{\infty} k(t) dt = K, \quad K_p(0) = \int_0^{\infty} k_p(t) dt = K_p,$$

$$\int_0^t k_p(t-\tau) x d\tau = x K_p, \quad \int_0^t k_p(t-\tau) e d\tau = e K_p.$$

Первые слагаемые в правой части каждого из равенств (18) и (19) представляют собой погрешности, вызванные двумя причинами: разбросом импульсных переходных и комплексных частотных характеристик на множестве экземпляров и их нестабильностью, а также отличием реального преобразования от идеального безинерционного, то есть такого, когда частотная характеристика практически не отличается от единицы, и тогда форма сигнала  $x(t)$  не искажается. Эта вторая причина вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения мгновенных значений быстропеременных величин, если их спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя.

Вторые слагаемые в формулах (18) и (19) своим происхождением обязаны погрешности применения, которая претерпела то же преобразование, что и измеряемая величина, и если ее спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя, то она частично фильтруется. Получившаяся

в результате составляющая погрешности измерения называется *наследственной погрешностью*.

Последние два слагаемых каждого из равенств (18) и (19) образуют в сумме собственную аддитивную абсолютную погрешность средства измерений.

### **3.2.3. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины с помощью цифровых средств измерений**

Метрологическая структурная схема прямых измерений приведена на рис. 16 и отличается от предыдущей (рис. 15) тем, что в цифровых средствах измерений осуществляется дискретизация непрерывно изменяющейся измеряемой величины, в результате чего может возникать погрешность, вызванная смещением моментов времени фактического измерения по отношению к заданным моментам  $t_i$  на  $\Delta t_i$ . В метрологической структурной схеме это обстоятельство отражено посредством представления в цепочке идеального преобразования, показанной пунктиром, операции идеальной дискретизации, которая должна выполняться строго по расписанию, а именно в моменты времени  $t_i$ . В цепочке реальных преобразований дискретизация выполняется в моменты времени, смещенные на время  $\Delta t_i$ , то есть в моменты времени  $t_i + \Delta t_i$ .

Смещение моментов дискретизации  $\Delta t_i$  называется *погрешностью датирования отсчетов*. Эта погрешность порождается затратами времени на аналого-цифровое преобразование, она непостоянна и зависит от значения измеряемой величины. Несмотря на смещение моментов измерения

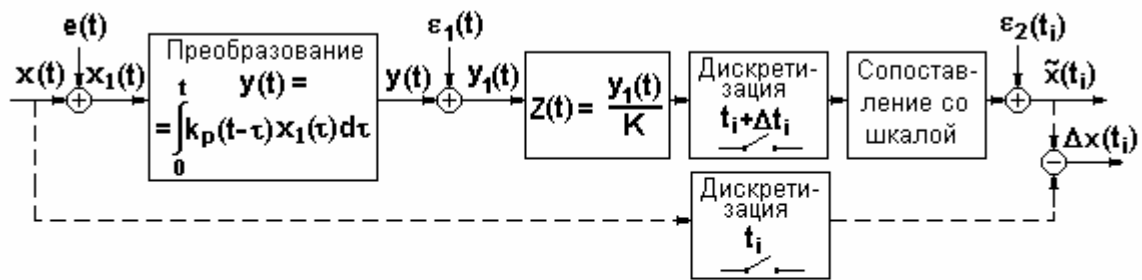


Рис. 16. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное цифровое

относительно расписания, результаты измерений регистрируются, как относящиеся к заданным моментам времени  $t_i$ . Но за время  $\Delta t_i$  значение измеряемой величины изменяется, в результате чего возникает погрешность измерения мгновенного значения изменяющейся величины, именуемая *апертурной погрешностью*, которая должна учитываться в составе погрешности  $\varepsilon_2$ . Аналогичная погрешность возникает и при расшифровке аналоговых записей переменных во времени величин. При этом она входит в состав погрешности расшифровки (см. раздел 3.2.2).

Апертурная погрешность аналого-цифрового преобразования может быть существенно снижена за счет применения перед АЦП специальных устройств, а именно устройств выборки-хранения (УВХ).

Апертурная погрешность равна нулю при измерении неизменных во времени величин.

В данном случае для погрешности измерений как функции времени применимо выражение (18), в котором следует все обозначения времени  $t$  снабдить индексом '  $i$  '. Выражение в частотной области получается в результате применения к такому выражению *дискретного преобразования Фурье*.

Вторая особенность цифровых средств измерений заключается в том, что выходной величиной (для приборов – показанием) является число, которое представлено конечным числом разрядов, двоичных или десятичных. Поэтому реальная и номинальная функции преобразования цифровых измерительных приборов (выходной код – десятичный) может быть записана в виде

$$\hat{N} = \text{Ent} \lfloor f_p(x) 10^n \rfloor, \quad N = \text{Ent} \lfloor f(x) 10^n \rfloor. \quad (20)$$

Функции преобразования аналого-цифровых преобразователей с двоичным выходным кодом имеют вид

$$\hat{N} = \text{Ent} \lfloor f_p(x) 2^n \rfloor, \quad N = \text{Ent} \lfloor f(x) 2^n \rfloor, \quad (21)$$

где  $x$  – величина на входе средства измерений,  $N$  – выходной код (показание) цифрового средства измерений,  $n$  – целое число,  $\text{Ent}[\bullet]$  – операция выделения целой части числа ‘•’.

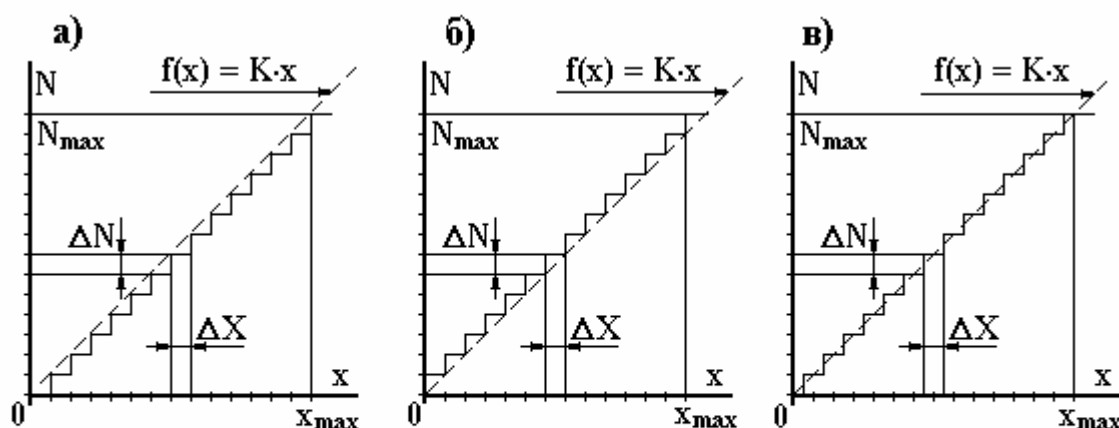


Рис. 17. Примеры функций преобразования цифровых измерительных приборов и АЦП

В результате функции преобразования цифровых средств измерений имеют ступенчатый характер и, строго говоря, никогда не станут линейными. Тем не менее характер зависимости выходного кода от входной величины именуют по характеру номинальной функции  $f(x)$ , которая присутствует в выражениях (20) и (21). Наиболее распространенными являются линейные цифровые средства измерений, номинальная функция преобразования которых есть  $\hat{N} = \text{Ent} \lfloor Kx 2^n \rfloor$ . В специальных случаях могут применяться квадратичные ( $f(x) = Kx^2$ ) и логарифмические ( $f(x) = K \log x$ ) цифровые средства измерений.

Примеры функций преобразования цифровых средств измерений представлены на рис. 17, на которых высота каждой ступени  $\Delta N$  есть единица младшего разряда выходного кода, а длина ступеньки  $\Delta X$  – цена единицы младшего разряда выходного кода, которая выражается в единицах

измеряемой величины. Из этих рисунков видно, что помимо погрешности, возникающей из-за отличия  $f_p(x)$  от  $f(x)$ , и собственной аддитивной погрешности, в составе инструментальной погрешности цифровых средств измерений непременно присутствует погрешность округления, не превышающая значения цены младшего разряда выходного кода.

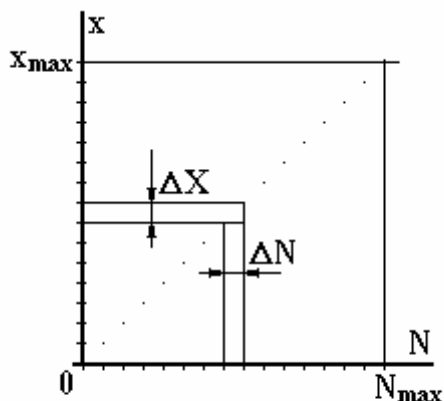


Рис. 18. Пример функции преобразования линейного ЦАП

Три примера, представленные на рис.17, демонстрируют три варианта расположения ступенчатой функции преобразования по отношению к номинальной. Наиболее выгодным является размещение ступенчатой функции со сдвигом на половину цены деления младшего разряда (см. рис.17, в)

Функции преобразования цифро-аналоговых преобразователей обратны функциям цифровых приборов и АЦП и тоже ступенчатые (рис. 18). У ЦАП

длина каждой ступеньки функции преобразования  $\Delta N$  есть единица младшего разряда входного кода, а высота ступеньки  $\Delta X$  – цена единицы младшего разряда входного кода, которая выражается в единицах выходной величины.

Показателем и характеристикой линейности цифровых измерительных приборов, АЦП и ЦАП является постоянство цены единицы младшего разряда кода (выходного или входного) во всем диапазоне измеряемых или воспроизводимых на выходе (у ЦАП) величин. В случаях, когда цена единицы младшего разряда непостоянна, это свойство называется *дифференциальной нелинейностью* и может нормироваться в специфических ситуациях. *Интегральная нелинейность* (то есть отличие функции  $f(x)$  в (20) и (21) от линейной) также может нормироваться.

### 3.3. Косвенные измерения

Метрологическую структурную схему косвенных измерений рассмотрим для случаев, когда результаты косвенных измерений вычисляются

с помощью компьютера, в память которого поступают или в нем формируются результаты прямых измерений, являющиеся входными данными для компьютерных программ. Эта же структурная схема справедлива и для тех случаев, когда результаты прямых измерений считываются со шкал аналоговых приборов, в том числе, стрелочных, или с цифровых индикаторов цифровых приборов, или с диаграмм, на которых зарегистрированы значения изменяющихся измеряемых величин, а затем результаты вводятся в компьютер с клавиатуры или обрабатываются вручную.

Наиболее общая процедура получения результатов косвенных измерений реализуется в многоканальных измерительных информационных системах (ИИС). В общем случае искомый результат вычисляется, как функция многих переменных – результатов прямых измерений параметров сложного объекта, полученных в различных измерительных каналах ИИС. В частных случаях результат косвенного измерения может быть функцией одной величины, измеряемой прямым методом. Такая ситуация возникает не только в ИИС, но и при применении цифрового прибора, оснащенного процессором или компьютером, или при ручной обработке результатов прямых измерений одной величины.

В метрологической структурной схеме, представленной на рис. 19, в качестве исходных данных используются результаты прямых измерений постоянных или изменяющихся измеряемых величин.

Итак, пусть искомая величина  $w$  связана с величинами  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , подлежащими прямым измерениям, функциональной зависимостью  $w = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ . Реальные вычисления дадут результат косвенного измерения  $\tilde{w} = f_p(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k)$ , содержащий абсолютную погрешность

$$\Delta w = \tilde{w} - w = f_p(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_k) - f(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

где  $\tilde{x}_1 = x_1 + \Delta x_1, \tilde{x}_2 = x_2 + \Delta x_2, \dots, \tilde{x}_k = x_k + \Delta x_k$  - результаты прямых измерений величин  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , индекс 'p' обозначает функцию, фактически реализуемую при вычислениях.

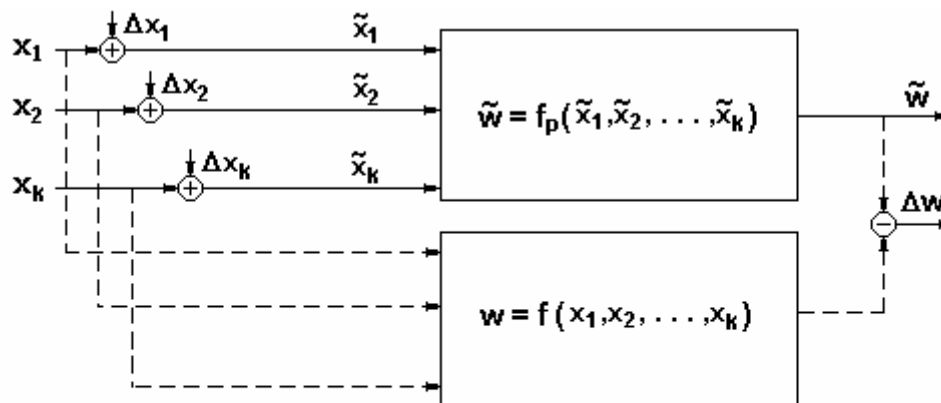


Рис. 19. Метрологическая структурная схема косвенных измерений, выполняемых ИИС

Погрешность результатов косвенных измерений возникает по следующим причинам:

приближенная реализация в цифровых ЭВМ непрерывных функций и операций, таких, например, как интегрирование и дифференцирование;

погрешности  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_k$  результатов прямых измерений, порождающие *наследственные погрешности* результата косвенных измерений;

погрешности, вызванные округлением при вычислениях, остановкой итерационных процессов и иными причинами.

При измерениях изменяющихся во времени измеряемых величин, выполняемых с помощью многоканальных ИИС, *апертурная погрешность*, входящая в состав погрешности результатов прямых измерений, может сильно возрасти. Это вызвано тем, что измерительные каналы ИИС опрашиваются компьютером последовательно и время опроса складывается из времени измерения в каждом канале, времени реализации протокола обмена и времени, обусловленного быстродействием устройств интерфейсного сопряжения. Поэтому моменты фактических измерений, выполняемых такими каналами, различаются. В то же время каждый результат косвенного измерения приписывается одному моменту времени, как правило, моменту времени обращения к первому каналу. При большом количестве каналов различие моментов времени фактических измерений величин, входящих в расчетные формулы, может оказаться существенным и вызвать значительные апертурные погрешности результатов косвенных измерений.



Таким образом, при измерении изменяющихся во времени величин с помощью многоканальных ИИС выражение для погрешности результата косвенных измерений будет иметь вид

$$\Delta w(t_i) = f_p(\tilde{x}_1(t_i + \Delta t_1), \tilde{x}_2(t_i + \Delta t_2), \dots, \tilde{x}_k(t_i + \Delta t_k)) - f(x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_k(t_i))$$

где  $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_k$  – погрешности датирования отсчетов в измерительных каналах ИИС, с увеличением номера канала эти погрешности возрастают.

Повторим, что значения погрешностей датирования отсчетов в ИИС определяются протоколом обмена, зависят от быстродействия устройств, обеспечивающих опрос каналов, и от быстродействия программ, управляющих опросом каналов.

Радикальным средством уменьшения погрешностей датирования отсчетов в многоканальных измерительных системах является многоканальное устройство выборки – хранения (УВХ). УВХ устанавливается перед коммутатором, и нормальный режим его работы – это режим слежения, то есть повторения выходным сигналом сигнала на входе. В момент  $t_i$  начала опроса каналов от компьютера по интерфейсному соединению приходит сигнал, переводящий УВХ в режим одновременного запоминания всех сигналов на выходе каналов системы. Коммутатор опрашивает каналы и по очереди отправляет мгновенные значения выходных сигналов, относящихся к одному и тому же моменту времени, на вход АЦП и далее в память компьютера для регистрации или обработки. Время перехода УВХ от режима слежения в режим запоминания составляет десятки наносекунд, а разброс этого времени еще меньше. Таким образом влияние погрешности датирования отсчетов устраняется практически полностью.

### **3.4. Классификация погрешностей средств измерений и результатов измерений**

В соответствии с определениями (см. гл. 1) и видами погрешностей средств измерений и результатов измерений эти погрешности классифицируются по следующим признакам.

Признак – *происхождение*:

Инструментальные;

*методические погрешности*, то есть погрешности, вызванные несовершенством используемого метода измерений;

погрешности применения.

Признак – *условия эксплуатации*:

*основная погрешность* (intrinsic error) – погрешность средства измерений, то есть инструментальная погрешность в *нормальных условиях эксплуатации* (in reference conditions),

погрешность в *рабочих условиях эксплуатации* (in normal conditions) – включает в себя две составляющие: основную погрешность и *дополнительную погрешность*.

Такое разделение погрешностей необходимо для того, чтобы обеспечить арбитражные испытания средств измерений в одних и тех же нормальных условиях. Это выражено в английском наименовании нормальных условий: "reference conditions".

Нормальные условия эксплуатации устанавливаются в соответствии с ГОСТ 8.395 "Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования". Нормальные условия – это довольно жесткие ограничения на пределы допускаемых изменений значений влияющих величин (например, температура и влажность окружающей среды, атмосферное давление, параметры внешних электрических и магнитных полей, напряжение питания, солнечная радиация, амплитуда вибраций, интенсивность солнечной радиации и др.), при которых определяется и контролируется основная погрешность средств измерений во время их метрологических испытаний. Такие ограничения необходимы для обеспечения взаимного доверия к результатам контроля метрологических характеристик, проводимого в стандартизованных условиях. Рекламации, вызванные превышением основной погрешностью установленной для нее нормы, принимаются только в том случае, когда это превышение установлено в нормальных условиях.

*Дополнительная погрешность* (complementary error) – составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или ее выхода за пределы нормальной области значений.

Признак – *характер зависимости от измеряемой величины* :

мультипликативная погрешность, пропорциональная значению измеряемой величины;

аддитивная погрешность – не зависит от измеряемой величины.

Признак – *характер проявления*:

систематическая погрешность;

случайная погрешность.

Признак – *режим измерения*:

погрешность измерений в статическом режиме;

погрешность измерений в динамическом режиме.

Признак – *способ представления*:

абсолютные погрешности;

относительные погрешности;

приведенные погрешности (fiducial errors).

Абсолютные и относительные погрешности могут служить характеристиками качества результатов измерений и средств измерений. Приведенные погрешности являются характеристикой только основной инструментальной погрешности средств измерений.

Приведенные погрешности вычисляются, как отношение абсолютной инструментальной погрешности средства измерений, определяемой формулами (8), (10), (13), к нормирующему значению измеряемой величины (fiducial value of a measurand) и выражаются, как правило, в процентах:

$$\gamma_{СИ} = \frac{\Delta_{инст}}{x_{норм}} 100\% .$$

В зависимости от особенностей средства измерений и характера зависимости абсолютной погрешности от измеряемой величины в качестве нормирующего значения  $x_{норм}$  могут использоваться следующие значения:

$x_{\text{норм}} = |x|_{\text{max}}$  – максимальное абсолютное значение измеряемой величины из диапазона измерения, выбирается, когда основной вклад в инструментальную погрешность вносит аддитивная составляющая, при использовании такого нормирующего значения для средств измерений нормируется приведенная погрешность,

$x_{\text{норм}} = |x|$  – модуль текущего значения измеряемой величины или результат измерения, выбирается, когда основной вклад в инструментальную погрешность вносит мультипликативная составляющая, при использовании такого нормирующего значения для средств измерений нормируется относительная погрешность,

$x_{\text{норм}} = |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$  – ширина диапазона измерения, выбирается, когда нуль шкалы находится внутри или вне диапазона измерения, при использовании такого нормирующего значения для средств измерений нормируется приведенная погрешность.

Только для аналоговых омметров (см. раздел 4.2), на шкале которых имеют отметки границ диапазона измерения '0' и '∞', применяется особое выражение для приведенной погрешности, в котором абсолютная погрешность и нормирующее значение измеряемой величины выражаются в единицах длины шкалы:  $\Delta l[\text{мм}] = k\Delta_{\text{инст}}$ ,  $L[\text{мм}]$  и

$$\gamma_{\text{ном}} = \frac{\Delta l}{L} 100 \quad .$$

Приведенные или относительные погрешности применяются при назначении и установлении норм (пределов допускаемых значений) на инструментальные погрешности средств измерений, как правило, для нормальных условий эксплуатации. Число, равное пределу допускаемой основной относительной или приведенной погрешности, используется в качестве условного обозначения *класса точности* (class index, accuracy class) измерительных приборов и преобразователей.

Класс точности средств измерений, погрешность которых нормируется линейной формулой, обозначается в виде несокращаемой дроби c/d.

### **3.5. Метрологические характеристики средств измерений, подлежащие нормированию**

### 3.5.1. Общие положения

Анализ метрологических структурных схем, выполненный ранее в разделах 3.1 – 3.3, свидетельствует о том, что инструментальная погрешность результатов измерений определяется свойствами средств измерений. Характеристики этих свойств называются *метрологическими характеристиками* средств измерений.

В ГОСТ 8.009–84 “Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений” приводится определение метрологических характеристик и их перечень, общий подход к выбору номенклатуры метрологических характеристик, а также способы установления норм на них и примеры применения.

В технической документации на средства измерений следует указывать перечень метрологических характеристик и нормы на них, исходя из того, что метрологические характеристики должны позволять:

прогнозировать характеристики погрешности результатов измерений при приобретении средства измерений или при планировании измерений,

оценивать характеристики погрешности результатов измерений – при выполнении измерений в реальных условиях эксплуатации,

контролировать сохранность при их испытаниях средств измерений с приемлемыми затратами без потери достоверности контроля.

Нормы на метрологические характеристики средств измерений устанавливаются в целях обеспечения гарантий их соблюдения и сохранности на момент приобретения средства измерений, в период их эксплуатации и хранения. В соответствии с ГОСТ 8.009–84 эти нормы сообщаются пользователю в нормативных документах: технических условиях (ТУ) или технических описаниях (ТО), а также в рекламной документации (выборочно) в виде пределов допускаемых значений метрологических характеристик. Гарантии сохранности метрологических характеристик обеспечиваются производителем и контролирующими государственными и ведомственными метрологическими органами путем метрологических испытаний средств измерений.

Метрологические характеристики делятся на следующие группы:

характеристики погрешности средств измерений;  
характеристики преобразования сигналов измеряемых величин и сигналов измерительной информации;  
характеристики взаимодействия с объектом и внешними средствами измерений,  
прочие метрологические характеристики, то есть метрологические характеристики, которые в соответствии с ГОСТ 8.009–84 при технической необходимости могут устанавливаться дополнительно сверх указанных в этом стандарте.

### 3.5.2. Характеристики погрешности средств измерений

Понятия, термины и определения, приведенные в этом и следующих разделах, соответствуют ГОСТ 8.009–84 и МИ 2247–93 “Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения”.

Для средств измерений нормируются характеристики основной и дополнительной погрешностей. Напомним, что основная погрешность – это погрешность средства измерений в нормальных условиях эксплуатации.

При отсутствии или пренебрежимой малости случайной составляющей погрешности устанавливается предел допускаемой основной погрешности, которая может быть представлена в виде абсолютной либо относительной погрешности либо как приведенная к некоторому *нормирующему значению* (fiducial value) измеряемой величины.

При наличии существенной случайной составляющей погрешности нормы на характеристики систематической и случайной составляющих устанавливаются отдельно:

предел допускаемой систематической составляющей погрешности;  
предел допускаемого среднеквадратического значения случайной составляющей погрешности.

Допускается устанавливать характеристику погрешности, которая включает в себя обе составляющие: систематическую и случайную. Такой характеристикой является интервал, заданный нижней ( $\Delta_H$ ) и верхней ( $\Delta_B$ ) границами, между которыми содержатся значения основной погреш-

ности с вероятностью, не меньшей заданной вероятности  $P_0$ , обычно равной 0,80 – 0,95, то есть

$$P(\Delta_H \leq \varepsilon \leq \Delta_B) \geq P_0.$$

Как правило, эти границы симметричны относительно нуля:

$$\Delta_H = -\Delta_B = -\Delta_X.$$

При зависимости погрешности средства измерений от измеряемой величины нормы на характеристики погрешности могут быть выражены в виде функции или графика. Самым распространенным видом такой зависимости является линейная зависимость, которая существует в линейном средстве измерений при соизмеримых значениях аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности (см. рис. 12). В этих случаях, как было указано в разделе 3.1.3, в отечественной метрологической практике нормируется основная относительная погрешность. Для нормирования применяется *двучленная формула*, которая выводится из общего выражения для абсолютной инструментальной погрешности (12).

В целях получения выражения для относительной погрешности разделим обе части равенства (12) на  $x$ :

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{инст}} &= \frac{\Delta K}{K} 100 \% + \frac{\varepsilon}{x} 100 \% = \frac{\Delta K}{K} 100 \% + \frac{\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} 100 \% + \frac{\varepsilon}{x} 100 \% - \frac{\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} 100 \% = \\ &= \left( \frac{\Delta K}{K} + \frac{\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} \right) 100 \% + \frac{\varepsilon}{|x_{\text{max}}|} \left( \frac{|x_{\text{max}}|}{x} - 1 \right) 100 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, если будут установлены такие значения  $c > 0$  и  $d > 0$ , что

$$\left( \left| \frac{\Delta K}{K} \right| + \frac{|\varepsilon|}{|x_{\text{max}}|} \right) 100 \% \leq c, \quad \frac{|\varepsilon|}{|x_{\text{max}}|} 100 \% \leq d,$$

то пределы допускаемой основной относительной погрешности могут быть нормированы в соответствии с ГОСТ 8.401 *двучленной формулой*:

$$|\gamma_{\text{инст}}| \leq \left[ c + d \left( \frac{|x_{\text{max}}|}{|x|} - 1 \right) \right] \%, \quad (22)$$

в которой значения коэффициентов  $c$  и  $d$  выбираются из ряда чисел, приведенного в ГОСТ 8.401 (см. также разд. 5.1):

$1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $(1,6 \cdot 10^n)$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $(3 \cdot 10^n)$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ , где  $n = 1, 0, -1, -2, \dots$ . Значения, указанные в скобках, не рекомендованы и используются в порядке исключения.

Снова обратимся к абсолютной инструментальной погрешности:

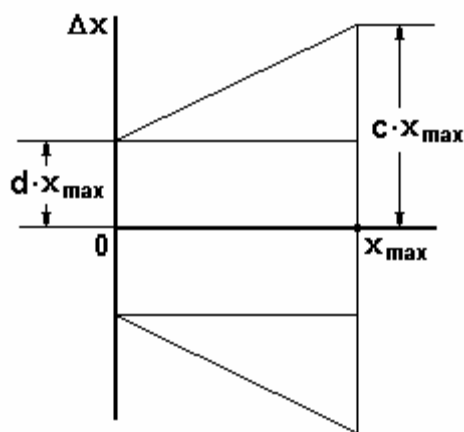


Рис. 20. Пределы допускаемой основной погрешности линейных средств измерений

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\gamma_{\text{инст}} x}{100} = \frac{\Delta K}{K} x + \varepsilon. \quad (23)$$

Из выражений (22), (23) следует, что допускаемые значения абсолютной инструментальной погрешности линейного средства измерений могут быть ограничены двумя прямыми линиями, (см. рис. 12, 20). В начале диапазона измерения при  $x = 0$  погрешность определяется только аддитивной составляющей  $\varepsilon$ , а  $d$  есть не что иное, как предел допускаемой приведенной аддитивной погрешности. В конце диапазона

при  $x = x_{\text{max}}$ , как это следует из двучленной формулы, пределом допускаемой приведенной погрешности является коэффициент  $c$ .

Нормы на характеристики дополнительной погрешности устанавливаются в виде пределов допускаемых *изменений* характеристик основной погрешности, вызванных отклонением влияющих величин от нормальных значений. Эти пределы указываются в долях от норм на соответствующие характеристики основной погрешности по каждой из влияющих величин раздельно.

При незначительной дополнительной погрешности или по требованию пользователя вместо указания характеристик основной погрешности могут быть приведены характеристики погрешности средства измерений для расширенной области изменения влияющих величин вплоть до области, соответствующей рабочим условиям применения (в англоязычных документах для обозначения рабочих условий применения средств измерений используется термин “normal conditions”). В таких случаях указание характеристик дополнительной погрешности оказывается излишним. Но



при этом следует иметь в виду, что экспериментальный контроль характеристик погрешности, установленных для рабочих условий, сильно усложняется, поскольку придется искусственно создавать указанные условия путем контролируемого воспроизведения совместного действия влияющих величин в широкой области значений и в достаточном объеме, требующемся для размещения в нем средства измерений.

К характеристикам погрешности средств измерений относятся метрологические характеристики, отражающие погрешности отсчитывания результата измерения или его округления при представлении результатов измерений или значений физических величин в цифровом коде.

Таковыми метрологическими характеристиками являются:

*цена наименьшего деления шкалы,*

*цена младшего разряда выходного кода АЦП или индикатора цифрового прибора,*

*значение наименьшей ступени физической величины, которая воспроизводится многозначными мерами, или величины, формируемой на выходе цифроаналогового преобразователя.*

### **3.5.3. Характеристики преобразования измеряемой величины и сигналов измерительной информации в измерительных информационных системах**

В документации на измерительный преобразователь должны быть указаны:

*номинальная функция преобразования (иначе – номинальная статическая характеристика преобразования) измеряемой величины  $f(x)$ ;*

*динамические характеристики, описывающие преобразование изменяющихся во времени сигналов измеряемой величины или сигналов измерительной информации.*

Форма представления номинальных характеристик – функция, график или таблица. Если номинальная функция преобразования линейна и проходит через начало координат, указывается значение номинального коэффициента преобразования.

Пределы допускаемых отклонений реальной функции преобразования от номинальной не нормируются, поскольку нормами на эти отклонения, по сути, являются нормы, которые установлены на характеристики погрешности.

Динамические характеристики указываются в документации на средства измерений, предназначенные для измерений в динамическом режиме. Предельно допускаемый разброс динамических характеристик на множестве экземпляров средств измерений ограничивается посредством установления граничных динамических характеристик (верхней и нижней).

Примерами динамических характеристик могут служить характеристики, которые были применены ранее при анализе метрологических структурных схем измерений в динамическом режиме в разд. 3.2.2, а именно *импульсная переходная характеристика (весовая функция)  $k(t)$* , использованная в выражениях (17, 18), и *комплексная частотная характеристика  $K(j\omega)$* , фигурирующая в выражении (19). Эти характеристики называются *полными динамическими характеристиками*. Они взаимно-однозначно связаны преобразованием Фурье:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t)e^{-j\omega t} dt, \quad k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

К полным динамическим характеристикам также относятся *передаточная функция*, которая получается из  $K(j\omega)$  простой заменой  $j\omega = p$ ;

*амплитудно-частотная характеристика  $A(\omega)$*  в комплекте с *фазо-частотной характеристикой  $\varphi(\omega)$* ;

*переходная характеристика  $H(t)$* .

Физический смысл импульсной переходной характеристики – это выходной сигнал линейного аналогового преобразователя, возникающий как реакция преобразователя на входной сигнал в виде  $\delta$ -функции, то есть очень короткого импульса, мощность которого достаточна для получения заметного сигнала на выходе.

*Переходная характеристика* – это выходной сигнал линейного аналогового преобразователя, возникающий как реакция преобразователя на входной сигнал в виде единичного скачка.

$$H(t) = \int_0^t k(\tau) d\tau, \quad k(t) = \frac{dH(t)}{dt}.$$

*Амплитудно-частотная характеристика* – это зависящее от частоты отношение амплитуды синусоидального выходного сигнала к амплитуде вызвавшего его синусоидального входного сигнала (то есть зависящий от частоты коэффициент усиления амплитуд гармоник входного сигнала).

*Фазочастотная характеристика* – зависящий от частоты сдвиг фазы выходного синусоидального сигнала по отношению к фазе вызвавшего его синусоидального входного сигнала и его гармоник.

$$A(j\omega) = |K(j\omega)|, \quad K(j\omega) = A(j\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

Комплексная частотная характеристика реального средства измерений представляет собой отношение двух полиномов от  $j\omega$ , причем степень полинома числителя не превосходит степени полинома знаменателя.

На рис. 21 в качестве примеров представлены графики некоторых из перечисленных характеристик первого и второго порядка, чему соответствуют индексы у обозначений этих характеристик. Переходная характеристика и импульсная переходная характеристика второго порядка имеют колебательный характер, амплитудно-частотная характеристика может иметь максимум, а ее фазочастотная характеристика с увеличением частоты стремится к  $(-\pi/2)$ . Фазочастотные характеристики всех физически реализуемых динамических звеньев отрицательны. Это говорит о том, что преобразование изменяющихся во времени величин сопровождается запаздыванием, различным на различных частотах.

В ряде случаев достаточными для применения оказываются менее подробные *частные динамические характеристики*, такие как *время реакции*  $t_p$  средства измерений (см. рис. 21) и граничные значения частот, между которыми амплитудно-частотная характеристика отклоняется от своего номинального значения не более, чем на заданную величину. На рис. 21 показана лишь верхняя частота  $\omega_B$  частотной полосы.

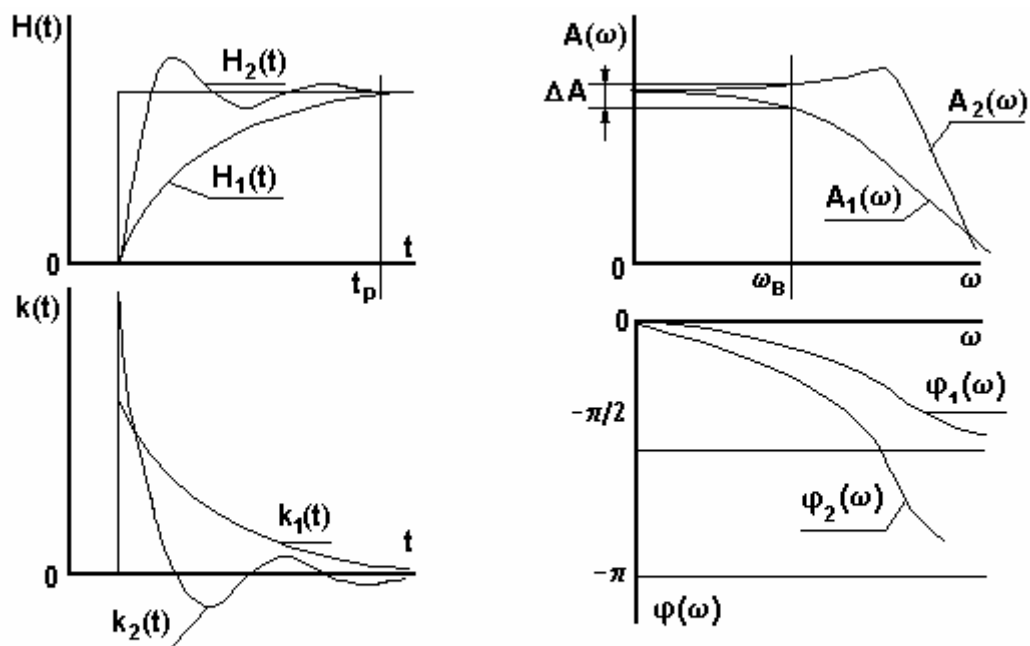


Рис. 21. Полные и частные динамические характеристики

*Время реакции средства измерений (response time)* – интервал времени между моментом скачкообразного изменения сигнала на входе средства измерений и моментом, начиная с которого выходной сигнал отличается от своего установившегося значения не более чем на заданную величину (например, не более чем на предел допускаемой основной погрешности).

*Динамические характеристики цифровых средств измерений:*

*максимальная частота измерений* (число измерений в единицу времени);

*длительность цикла одного преобразования;*

*погрешность датирования отсчетов*, в качестве которой в большинстве случаев используется длительность цикла преобразования.

*Динамические характеристики цифроаналоговых преобразователей и программно управляемых калибраторов:*

*максимальный темп смены входного кода* при условии установления значения выходной величины с нормированной точностью;

*время реакции на смену входного кода.*

При управлении цифровым измерительным прибором, аналого-цифровым преобразователем, ЦАП или калибратором от компьютера зна-

чения перечисленных характеристик должны указываться с учетом быстрого действия элементов используемого интерфейса, управляющих программ и компьютера.

#### **3.5.4. Характеристики взаимодействия с объектом и внешними средствами измерений**

Характеристики свойств средства измерений, отражающие их способность к взаимодействию с внешними объектами или устройствами:

*диапазон изменения измеряемой величины на входе средства измерений (диапазон измерения),*

*входное сопротивление (или входной импеданс, или сила потребляемого от объекта тока) для средств измерений силы тока, напряжения, мощности, электрической энергии, измерительных преобразователей с электрическим входным сигналом,*

*выходное сопротивление (или выходной импеданс) для аналоговых измерительных преобразователей с электрическим выходным сигналом,*

*другие характеристики средств измерений, отражающие их способность влиять на объект измерения, на информативные параметры сигнала измеряемой величины,*

*вид выходного кода, количество разрядов выходного кода аналого-цифровых преобразователей и цифровых приборов, снабженных устройствами связи с компьютером (процессором),*

*вид входного кода, количество разрядов входного кода, цена единицы младшего разряда входного кода ЦАП и кодоуправляемых калибраторов.*

#### **3.5.5. Метрологические характеристики однозначных и многозначных мер**

Для мер, в том числе, для государственного эталона и государственных стандартных образцов нормируются метрологические характеристики из следующего перечня.

1. Для однозначных мер нормируются следующие метрологические характеристики:

номинальное значение величины, воспроизводимое мерой,  
предел допускаемой основной относительной погрешности воспроизведения значения величины,

действие влияющих величин на значения воспроизводимой величины, которое, в свою очередь, нормируется одним из следующих способов:

пределами допускаемых дополнительных погрешностей – по каждой влияющей величине отдельно,

функциональной зависимостью значения воспроизводимой величины от влияющих величин – для введения поправок.

2. Для многозначных мер нормируются следующие метрологические характеристики:

диапазон значений величины, воспроизводимых мерой;

значение наименьшей ступени величины, воспроизводимой мерой,

выходное сопротивление или импеданс – для мер, воспроизводящих электрические величины, или характеристика взаимодействия меры с устройством, для которого воспроизводится величина;

пределы допускаемой основной относительной погрешности воспроизведения значений величины (нормируются двучленной формулой путем задания коэффициентов  $c$  и  $d$ );

пределы допускаемой дополнительной погрешности, нормируются по каждой влияющей величине отдельно;

для мер, управляемых дистанционно (например, от компьютера) указывается вид входного кода, диапазон его возможных значений, номинальная цена единицы младшего разряда входного кода, время реакции выходного сигнала на изменение входного кода на значение, равное 80 % диапазона значений этого кода.

#### **4. ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

#### 4.1. Государственное управление обеспечением единства измерений

Управление деятельностью по обеспечению единства измерений в Российской Федерации осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии через подведомственные ему метрологические службы.

*Метрологическая служба* – совокупность субъектов деятельности и видов работ, направленных на обеспечение единства измерений.

Органы государственной метрологической службы:  
государственные научные метрологические центры;  
органы государственной метрологической службы на территории субъектов Федерации;

государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ);

государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО);

государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Государственный метрологический надзор и контроль соблюдения метрологических правил и норм, установленных законодательными актами, стандартами и другими нормативными документами, осуществляют должностные лица федерального агентства – государственные инспекторы по обеспечению единства измерений.

Государственный метрологический надзор и контроль распространяется на следующие сферы:

здравоохранение, ветеринария, охрана окружающей среды, обеспечение безопасности труда;

торговые операции и взаимные расчеты между покупателем и продавцом;

государственные учетные операции;

обеспечение обороны государства;

геодезические и гидрометеорологические работы;

банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции;

- производство продукции по контрактам для государственных нужд РФ;
- измерения, выполняемые при обязательной сертификации продукции и услуг;
- измерения, проводимые по поручению судебных и арбитражных органов;
- регистрация национальных и международных рекордов.

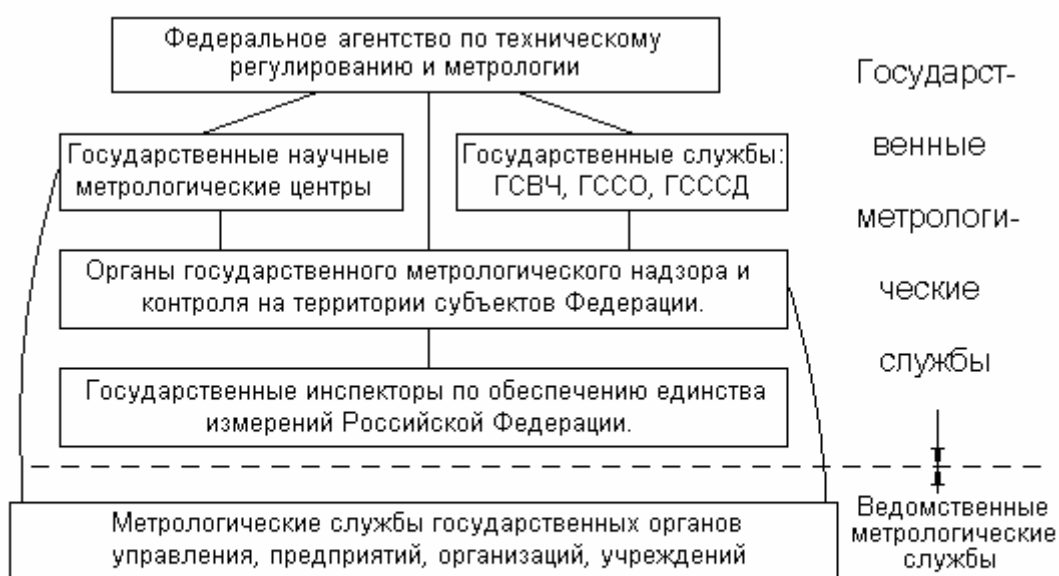


Рис. 22. Метрологические службы Российской Федерации

Государственные органы управления Российской Федерации а также предприятия, организации и учреждения, являющиеся юридическими лицами, в случае необходимости создают собственные (ведомственные) метрологические службы, которые должны в обязательном порядке участвовать в выполнении работ из вышеприведенного перечня.

Структура метрологических служб представлена на рис. 22.

Функции органов метрологической службы (см. рис. 22) состоят в следующем.

*Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии:*



координирует деятельность по обеспечению единства измерений в Российской Федерации, руководит деятельностью метрологических служб; устанавливает правила создания, утверждения, хранения и применения государственных эталонов;

представляет правительству Российской Федерации проекты законодательных актов по вопросам обеспечения единства измерений и предложения по единицам величин, допускаемых к применению;

определяет общие требования к средствам, методам и результатам измерений;

участвует в деятельности международных метрологических организаций через своих представителей.

*Государственные научные метрологические центры:*

несут ответственность за создание, совершенствование, хранение и применение государственных эталонов по своей специализации;

разрабатывают нормативные документы по вопросам обеспечения единства измерений;

проводят испытания средств измерений по своей специализации в целях утверждения типа;

выполняют метрологическую экспертизу методик выполнения измерений, проектов, технических заданий на разработку изделий и иных документов;

обеспечивают научное и методическое руководство органами государственного метрологического надзора и контроля на территории субъектов Федерации;

осуществляют лицензирование деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений;

осуществляют аккредитацию метрологических служб государственных органов и других юридических лиц на право испытаний и сертификации средств измерений, а также на право аттестации методик выполнения измерений и проведения метрологической экспертизы документов.

Из приведенного перечня функций Федерального агентства по метрологии и научных метрологических центров следует, что основными сферами их деятельности являются *законодательная и теоретическая (или фундаментальная) метрология.*

*Законодательная метрология* – раздел метрологии, предмет которой – установление единых метрологических правил и норм, направленных на обеспечение единства измерений, а также контроль за их исполнением.

*Теоретическая (фундаментальная) метрология* – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

Основная сфера деятельности ведомственных метрологических служб – *практическая (или прикладная) метрология*.

*Практическая (прикладная) метрология* – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

Государственные службы ГСВЧ, ГССО, ГСССД осуществляют межрегиональную и межотраслевую координацию работ по обеспечению единства измерений в соответствии со специализацией служб.

Органы государственной метрологической службы, действующие на территории субъектов Федерации, выполняют на этой территории государственный метрологический надзор и контроль за соблюдением метрологических норм и правил, находящихся в сферах компетентности государственных органов.

Государственные инспекторы по обеспечению единства измерений – непосредственные исполнители работ по государственному метрологическому надзору и контролю на конкретных объектах. Для осуществления надзора и контроля государственный инспектор имеет право посещать любые предприятия независимо от их подчиненности и вида собственности. При выявлении нарушений метрологических правил и норм инспектор имеет право:

запрещать применение дефектных средств измерений и при необходимости изымать такие средства измерения из эксплуатации;

представлять предложения по аннулированию ранее выданных лицензий на метрологическую деятельность и по отмене решений об аккредитации метрологических лабораторий и служб;

давать обязательные предписания о ликвидации нарушений метрологических правил и норм.

Метрологические службы и подразделения органов государственного управления, предприятий, организаций и учреждений:

проводят надзор за состоянием и применением средств измерений, за аттестованными методиками выполнения средств измерений, за соблюдением сроков периодических испытаний средств измерений;

выпускают обязательные предписания по обеспечению единства измерений в подведомственных им подразделениях.

Основным способом надзора за состоянием средств измерений является экспериментальное определение или контроль сохранности метрологических характеристик средств измерений при их метрологических испытаниях. Возможны два вида метрологических испытаний средств измерений: *поверка* и *калибровка*.

*Поверка средств измерений* – совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (или другими уполномоченными на это органами) в целях определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям.

Обязательной поверке подвергаются средства измерений, подлежащие обязательному государственному метрологическому контролю и надзору.

Полномочия на право выполнения поверки подтверждаются путем аккредитации соответствующим предприятием или лабораторией Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, или государственным научным метрологическим центром в соответствии со специализацией.

*Калибровка средств измерений* – совокупность операций, выполняемых в целях определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего обязательному государственному метрологическому контролю и надзору.

Калибровка выполняется метрологическими службами юридических лиц для собственных нужд. Метрологические службы юридических лиц могут быть аккредитованы государственными научными метрологическими центрами на право выполнения калибровочных работ. При этом аккредитованным метрологическим службам дается право выдавать сертификаты о калибровке от имени органов, которые их аккредитовали.

*Сертификат об утверждении типа средств измерений* – документ, выдаваемый уполномоченным на то государственным органом и удостоверяющий, что данный тип средств измерений утвержден в установленном порядке и соответствует установленным требованиям.

После утверждения типа средства измерений оно заносится в *государственный реестр средств измерений*.

Все услуги по поверке и калибровке средств измерений, метрологической экспертизе документов и по сертификации средств измерений подлежат оплате в соответствии с договорами, которые заключаются между заказчиком услуги и ее исполнителем.

Аккредитация метрологических служб юридических лиц на право выполнения метрологических работ выполняется по их инициативе на основе договоров, заключаемых с государственными научными метрологическими центрами, органами государственной метрологической службы Федерального агентства в соответствии с их специализацией.

Основным условием аккредитации является наличие:

необходимого метрологического и вспомогательного оборудования;

квалифицированного персонала;

библиотеки стандартов и других нормативных документов, необходимых для выполнения заявляемой деятельности;

помещений для проведения метрологических работ, соответствующих по площади, состоянию, условиям, санитарным нормам, требованиям выполнения измерений, поверки и калибровки.

## **4.2. Государственные научные метрологические центры России**

Государственные научные метрологические центры Российской Федерации:

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева* (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 198005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19) – главный государственный центр обеспечения единства измерений. Специализация:

электрические и магнитные величины;

масса, длина, угол, сила;

линейные и угловые скорость и ускорение;  
параметры вибраций и удара;  
температура от 0°С и выше;  
теплофизика, пульсации температуры;  
скорость потоков жидкости и газа;  
переменные давления в жидкой среде;  
ионизирующие излучения (активность, дозиметрия,  $\alpha$ ,  $\beta$ , нейтронные);  
оптика (показатель преломления, колориметрия);  
физико-химические измерения, метрологическое обеспечение экологического мониторинга;  
метрологическое обеспечение робототехники.

*Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы* (ВНИИМС, 119361, Москва, ул. Озерная, 46) – головная организация государственной метрологической службы. Специализация:

абсолютное давление;  
высокое и сверхвысокое напряжение;  
шероховатость поверхностей;  
хроматографический количественный анализ;  
измерительные информационные системы.

*Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений* (ВНИИОФИ, 119361, Москва, ул. Озерная, 46). Специализация:

лазерное излучение (мощность, длина волны, фаза);  
яркость, колориметрия;  
измерения в медицине;  
неразрушающий контроль.

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений* (ВНИИФТРИ, 141570, Московская обл., Менделеево). Специализация:

служба точного времени (время, частота);  
ионизирующие излучения (головной центр);  
температура (ниже 0°С);  
магнитная индукция;

радиотехнические измерения (высокие частоты и СВЧ);  
твердость;  
акустика и гидроакустика.

*Уральский научно-исследовательский институт метрологии* (УНИИМ, 620219, Екатеринбург, Красноармейская ул. 4) – головной институт в области создания и хранения стандартных образцов веществ и материалов, а также ведения государственного реестра стандартных образцов веществ и материалов. Специализация:

стандартные образцы;  
трансформаторы тока;  
счетчики электрической энергии;  
отклонения от линейности;  
влажность зерна (государственный эталон).

*Сибирский научно-исследовательский институт метрологии* (СНИИМ, 630004, Новосибирск, ул. Димитрова 4) – головной институт второй (Сибирской) эталонной базы. Специализация – хранение резерва государственных эталонов в виде рабочих эталонов. Дополнительная специализация:

большие массы;  
угол;  
тепловой поток.

*Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии* (ВНИИР, 420029, Казань, ул. 2-я Азинская, 7а).

*Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации агропромышленной продукции* (ВНИИСагропродукт, 350063, Краснодар, ул. Постовая, 36).

*Метрологический центр министерства обороны* (Московская обл., Мытищи). Специализация–хранение всех рабочих эталонов по основным видам измерений, осуществление метрологического контроля и надзора за средствами измерений, эксплуатирующимися в организациях, учреждениях и подразделениях министерства обороны.

*Восточно – сибирский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений* (664056, Иркутск, ул. Бородинна, 57). Специализация:

радиотехнические измерения;  
время, частота;  
измерение электрических величин.

*Дальстандарт* (680000, Хабаровск, ул К.Маркса, 65). Специализация:  
теплофизика;  
неразрушающий контроль.

### **4.3. Международные метрологические организации**

Международная научная и практическая деятельность по обеспечению единства измерений координируется несколькими международными организациями, разграничивающими области своей компетенции по научно–техническому и территориальному признакам.

BIPM – Bureau International des Poids et Mesures (МБМВ– Международное бюро мер и весов, Севр, Франция) – первая международная организация. Основной вид деятельности – координация работ по международным сличениям государственных эталонов.

OIML – Organisation International de Metrologie Legale (МОЗМ – Международная организация законодательной метрологии, Париж, Франция) – координирует разработку международных нормативных документов, регламентирующих основные метрологические нормы и правила в области испытаний и применения средств измерений, нормирования и контроля метрологических характеристик средств измерений, разработки и экспертизы методик выполнения измерений и оценки характеристик погрешности измерений.

Деятельность этих двух организаций поддержана нормативными документами, которые разрабатываются с их участием *Международной организацией по стандартизации – ИСО* (International Organisation for Standartization – ISO, Женева, Швейцария). В документах ИСО применяются метрологические рекомендации, разработанные МБМВ И МОЗМ.

*Международная электротехническая комиссия – МЭК* (International Electrotechnical Comission – IEC, Женева, Швейцария), применяет в метрологических разделах своих документов правила и методы, установленные МБМВ, МОЗМ, ИСО.

Научная деятельность, посвященная развитию науки об измерениях, теории и практики измерений, проблемам обучения метрологии и измерениям, координируется *Международной Измерительной Конфедерацией – ИМЕКО* (International Measurement Confederation – ИМЕКО, Будапешт, Венгрия) посредством организации и проведения международных конгрессов, симпозиумов, научных школ по широкому кругу проблем теории измерений, теоретической, прикладной и законодательной метрологии.

В целях объединения усилий и средств для выполнения дорогостоящих метрологических работ, таких как создание и использование эталонов, выполнение поверочных и калибровочных работ, для унификации законодательных документов метрологические институты и метрологические лаборатории стран Северной Америки и стран – членов ЕЭС в конце 80-х годов XX века начали создавать союзы.

В объединенной Европе образованы следующие союзы сотрудничающих институтов и лабораторий.

EUROMET (ЕВРОМЕТ – сотрудничество европейских институтов по метрологии) – координирует совместную в рамках стран – членов ЕЭС разработку эталонов и сложных измерительных систем во избежание дублирования, а также совместное использование этих эталонов и установок.

WELMЕС – Западно – Европейское сотрудничество в области законодательной метрологии.

WECC – Западноевропейский калибровочный союз.

WELAC – Западноевропейское сотрудничество по аккредитации испытательных лабораторий.

В 1991 году между калибровочными службами стран, входящих в ЕЭС и ЕАСТ (Европейская ассоциация свободной торговли) были заключены первые двусторонние соглашения по взаимному признанию сертификатов о калибровке средств измерений. Эти соглашения утверждены Европейской организацией по испытаниям и сертификации.

По примеру Европы в 1993 году США, Канада и Мексика организовали союз метрологических институтов NORAMET. Цели этого союза и формы сотрудничества аналогичны тем, которыми руководствуется ЕВРОМЕТ.



Перечисленные европейские объединения и союзы действуют при административной поддержке комиссаров и парламента объединенной Европы.

КООМЕТ – Восточно-Европейская организация по метрологии. В нее входят следующие государства: Беларусь, Болгария, Казахстан, Куба, Литва, Молдова, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Украина.

#### **4.4. Передача размеров единиц величин рабочим средствам измерений от государственных эталонов**

Основным практическим мероприятием, обеспечивающим единство размеров единиц однородных величин вне зависимости от места выполнения измерений, является процедура передачи размера единицы величины от государственного эталона к рабочему средству измерений. Эта процедура, по сути, есть процедура передачи к рабочему средству измерений участка шкалы величины, и результат измерения получается путем сопоставления сигнала измерительной информации с данным участком шкалы (см. метрологические структурные схемы в разделах 3.1.1, 3.1.3, 3.1.4).

Указанная процедура строго регламентируется соответствующими нормативными документами, которые называются *поверочными схемами*. Общие принципы составления поверочных схем, относящихся к различным величинам, подлежащим измерениям, изложены в ГОСТ 8.061 “Государственная система обеспечения единства измерений. Поверочные схемы. Содержание и построение”.

В соответствии с действующими документами (например, МИ 2247 “Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения”) *поверочная схема – нормативный документ*, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений, содержащий описание методов и погрешностей при передаче.

Терминология международных документов, применяемая для обозначения поверочной схемы, неоднозначна. Особенно большим разнообразием отличаются английские названия поверочной схемы: *traceability chart, hierarchy scheme, verification chart*.

Общая структура соподчиненности средств измерений, участвующих в передаче размера единицы (участка шкалы) от государственного эталона рабочим средствам измерений, приведена в ГОСТ 8.061 (рис. 23).

Термины, используемые в поверочных схемах, регламентированы МИ 2247.

*Эталон* – средство измерений или комплекс средств измерений, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденные в качестве эталона в установленном порядке.

*Государственный первичный эталон* – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью и признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на всей территории Российской Федерации.

*Вторичный эталон* – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.

*Рабочий эталон* – эталон, предназначенный для передачи размера единицы (участка шкалы) рабочим средствам измерений. Данный термин заменил собой термин “образцовое средство измерений”. При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды, количество которых не ограничено.

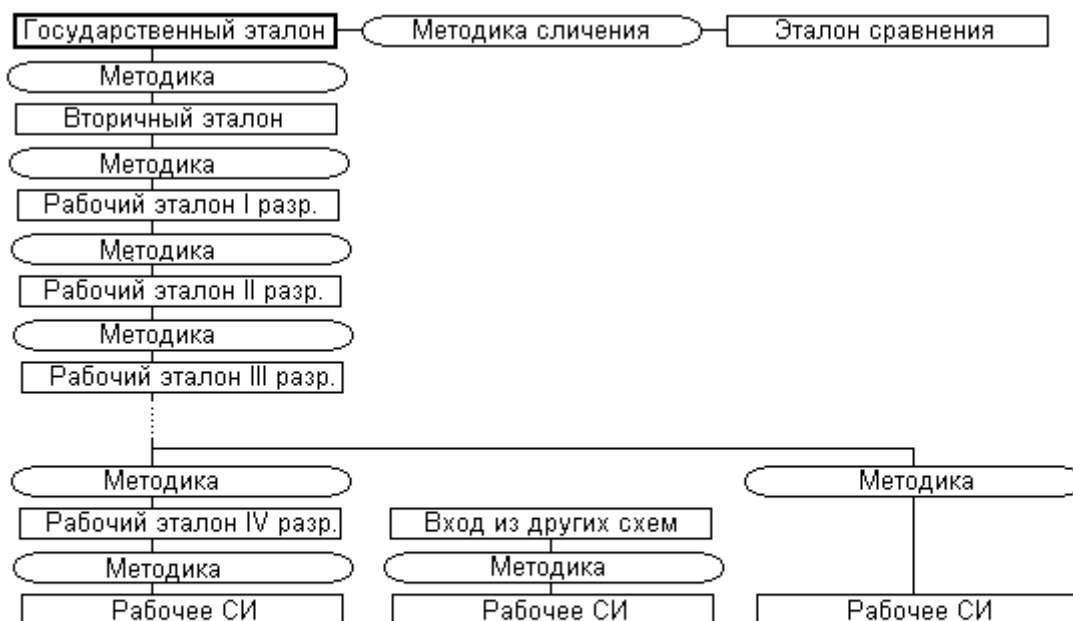


Рис. 23. Структура государственных поверочных схем

*Эталон сравнения* – эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Государственный первичный эталон находится во главе поверочной схемы, на ее высшей ступени, на той же ступени – эталон сравнения, предназначенный для выполнения сличений с международным эталоном или круговых сличений государственных эталонов нескольких стран.

Для обеспечения надлежащей сохранности государственного эталона количество обращений к нему ограничивается. Поэтому предусматриваются вторичные эталоны, которые непосредственно взаимодействуют с наивысшим рабочим эталоном.

Две соседние ступени типовой поверочной схемы соединены методикой выполнения передачи единицы (части шкалы) со ступени на ступень. Средство измерений, находящееся на верхней ступени из двух соседних, и методика должны обеспечивать погрешность этого сличения не хуже чем  $1/3$  предела допустимой погрешности, нормированного для рабочего эталона или рабочего средства измерений, находящегося на нижней ступени.

В поверочной схеме величины, зависящей от двух и более величин (например, электрической мощности), предусматривается вход из поверочной схемы другой (других) величин (см. рис. 23).

Передача единицы (части шкалы) на самую нижнюю ступень выполняется при поверке (или калибровке) рабочего средства измерений. Требования к соотношению характеристик погрешности при этом остаются теми же, что установлены для остальных ступеней. Все методики, кроме методик калибровки, в обязательном порядке должны утверждаться уполномоченным на то государственным органом.

Количество ступеней в поверочных схемах различных величин может быть разным. Однако с увеличением количества ступеней точность передачи утрачивается. Поэтому обычно стремятся минимизировать количество этих ступеней. В частности, количество ступеней поверочной схемы времени и частоты может быть сокращено до двух за счет передачи по радиоканалу выходного сигнала эталона секунды, которая в обязательном порядке воспроизводится через количество периодов несущей частоты этого сигнала.

Для обеспечения единства измерений при выполнении количественного химического анализа используются стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. ГОСТ 8.315 “Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы. Основные положения” устанавливает следующие категории стандартных образцов:

- государственные стандартные образцы (ГСО);
- отраслевые стандартные образцы (ОСО);
- стандартные образцы предприятий (СОП).

Стандартным образцам, включенным в поверочные схемы, присваиваются разряды.

В последнее время в связи с выходом новых международных нормативных документов в области метрологии и с необходимостью приближения отечественных документов к международным Федеральное агентство по метрологии и стандартизации принимает меры по пересмотру российских нормативных документов. Этот пересмотр затронет, в основном, терминологию и приведет к снижению степени обязательности некоторых стандартов.

#### **4.5. Метрологическое обеспечение разработки, производства и применения средств измерений**

Решение задачи обеспечения единства измерений невозможно без метрологического надзора за установлением значений метрологических характеристик средств измерений при их разработке и за сохранностью метрологических характеристик средств измерений при их производстве, транспортировании, хранении и применении.

Общие рекомендации по этому вопросу приведены в международном документе № 16 МОЗМ “Принципы обеспечения метрологического управления” (“Principles of assurance of metrological control”. OIML, Paris, France). На рис. 24 представлена структурная схема, иллюстрирующая данные принципы.

Эти принципы в полной мере соответствуют отечественной системе метрологического мониторинга разработки, испытаний, транспортирования, хранения и применения средств измерений, которая формировалась с развитием приборостроения и метрологии и поддерживается традициями, законодательными актами, стандартами и иными нормативными документами Российской Федерации.

На рис. 25 представлена структурная схема этапов разработки, испытаний, производства и применения средств измерений, принятая в Российской Федерации

На этой схеме отдельные этапы обозначены цифрами:

1. Составление технического задания (ТЗ) на разработку средства измерений.

Вместе с заказчиком составляется перечень метрологических характеристик, подлежащих нормированию, и устанавливаются нормы на эти характеристики. Должны быть учтены:

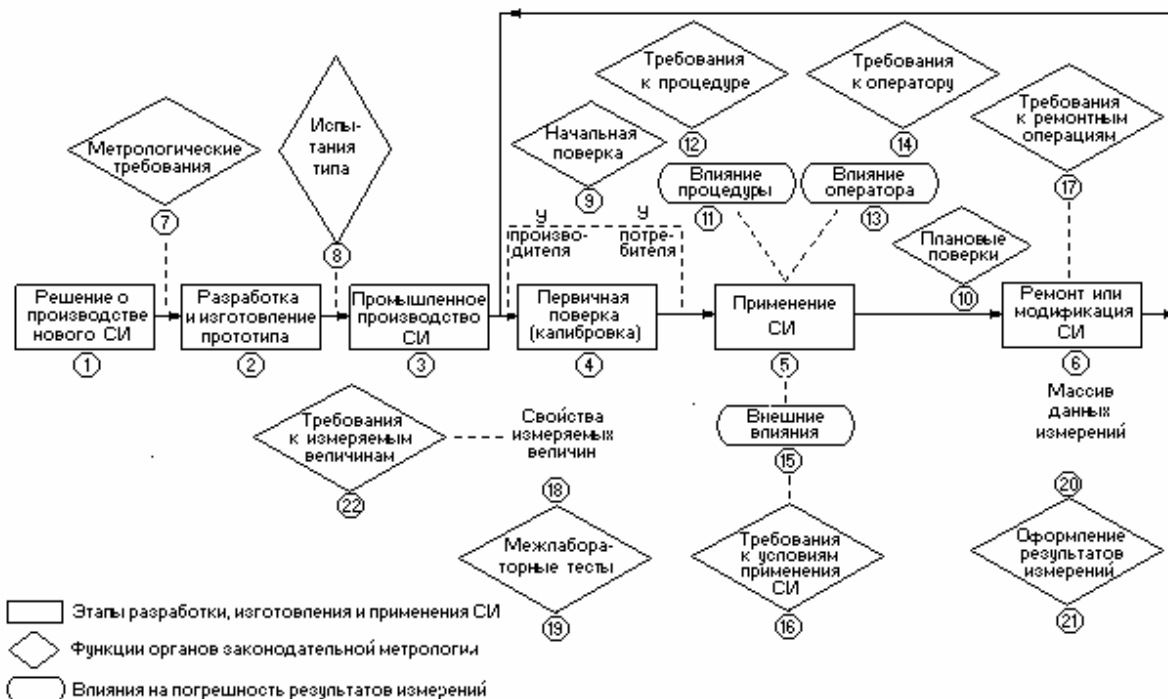


Рис. 24. Генеральная схема метрологического мониторинга средств измерений (по документу № 16 МОЗМ)

условия применения будущего средства измерений;  
 требования ГОСТ 8.009, изложенные выше в разделе 3.5.1;  
 требования ГОСТ 8.513 “Государственная система обеспечения единства измерений. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения”;

при разработке ИИС – требования ГОСТ 8.596 “Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения” и ГОСТ 8.438 “Государственная система обеспечения единства измерений. Системы информационно-измерительные. Поверка. Общие положения”.

Если заказчик настаивает на нормировании таких метрологических характеристик, для контроля которых при калибровке или поверке рабочие эталоны отсутствуют, то в соответствии с действующими правилами эти эталоны также должны быть разработаны за счет средств заказчика.

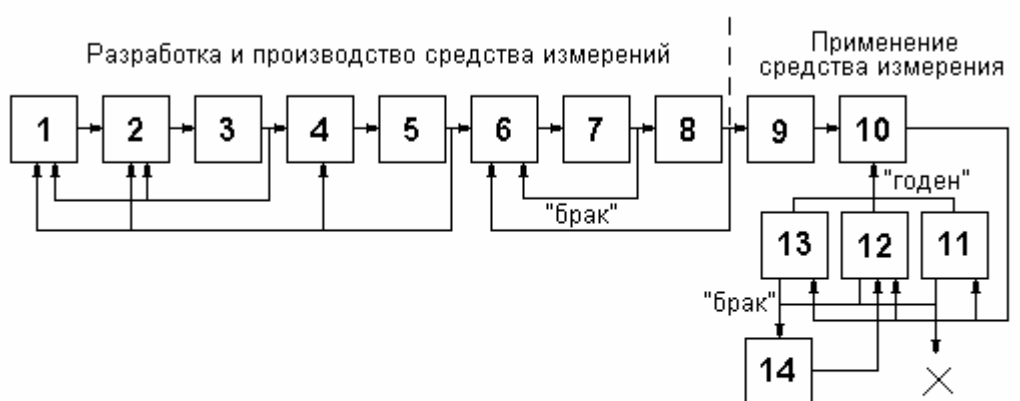


Рис. 25. Этапы разработки, производства, применения и метрологического контроля средств измерений

В соответствии с ГОСТ 8.395 “Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования” устанавливаются нормальные условия путем указания нормальной области значений всех влияющих величин.

При необходимости проводится метрологическая экспертиза ТЗ.

2. Разработка средства измерений в соответствии с ТЗ.

3. Заводские (лабораторные) испытания макета средства измерений и рабочего эталона, если таковой разрабатывается.

Проверяются возможности удовлетворения требованиям ТЗ, с какой целью должны использоваться средства и методики, эквивалентные рабочим эталонам в отношении характеристик погрешности.

При отрицательных результатах возврат к этапу 2 или, в крайнем случае, к этапу 1 в целях пересмотра требований ТЗ по согласованию с заказчиком.

4. Изготовление опытного образца, одного или нескольких экземпляров, разработка проекта технических условий (ТУ). Обязательным разделом технических условий или обязательным отдельным документом, разрабатываемым на данном этапе, является “Методика поверки” или “Методика калибровки” средства измерений.

Раздел ТУ или документ “Методика поверки” разрабатывается в тех случаях, когда средство измерений подлежит государственному метроло-

гическому контролю и надзору и (или) подлежит процедуре утверждения типа и занесению в государственный реестр средств измерений.

Раздел ТУ или документ “Методика калибровки” разрабатывается в остальных случаях. Положительный результат калибровки не дает права на утверждение типа.

Эти документы при их утверждении являются основными при решении споров между заказчиком и исполнителями (разработчиком и производителем средства измерений).

Следует учитывать:

требования МИ 2178 “Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок разработки, рассмотрения, утверждения и регистрации рекомендаций по метрологии, утверждаемых метрологическими институтами”;

требования ГОСТ 8.513;

если разрабатывается ИИС, - требования ГОСТ 8.596.

#### 5. Приемочные испытания.

Если разрабатывается средство измерений специального назначения только для внутреннего использования на предприятии заказчика и эти испытания носят межведомственный характер, тогда метрологическая часть испытаний выполняется в соответствии с “Методикой калибровки”. В приемочной комиссии должны быть представлены: заказчик, при необходимости—ведомство заказчика, предприятие-разработчик и предприятие—потенциальный изготовитель.

Если разрабатывается средство измерений широкого назначения и (или) подлежащее обязательному государственному метрологическому надзору и контролю и предназначенное для утверждения типа и занесения в государственный реестр средств измерений, испытания выполняются государственными научными метрологическими центрами. Метрологическая часть испытаний выполняется в соответствии с “Методикой поверки”. Члены комиссии—представитель органа государственной метрологической службы (в качестве председателя комиссии), представитель предприятия-разработчика (заместитель председателя), представители предприятия—потенциального изготовителя, а также представители иных организаций и предприятий по требованию органа, проводящего испытания.



На испытания предъявляются:

- техническое задание на разработку;
- проект программы испытаний;
- проект ТУ с проектом документа “Методика поверки”, если соответствующий раздел в ТУ отсутствует;
- проект эксплуатационных документов,
- опытные образцы разработанного средства измерений в установленном количестве;
- протокол предварительных заводских (лабораторных) испытаний;
- предложение по установлению длительности интервала между периодическими поверками (см. также этап 11),
- все перечисленное для рабочего эталона, если он разрабатывался.

При положительном результате испытаний, если целью этих испытаний было утверждение типа, выдается сертификат об утверждении типа средства измерений, утверждается ТУ и документ “Методика поверки”. Если он выполнен отдельно от ТУ, устанавливается длительность интервала между периодическими поверками, средство измерений заносится в государственный реестр средств измерений, разрешенных к применению. Процедура утверждения, согласования и регистрации ТУ регламентирована ГОСТ Р 1.3 “Государственная система стандартизации. Порядок согласования, утверждения и регистрации технических условий”

При отрицательном исходе испытаний возможны варианты решений:

- признать разработку бесперспективной;
- вернуть все материалы на доработку на один из этапов (рис. 25).

#### 6. Производство и выпуск средства измерений.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем:

- оснащения технологического процесса необходимыми средствами измерений, надзор и контроль за состоянием этих средств измерений;
- метрологической экспертизы технологической документации;

#### 7. Выходной контроль при выпуске из производства.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем организации и выполнения выходного метрологического контроля в соответствии с разделом ТУ или отдельным документом “Методика поверки (калибровки)”, утвержденным на этапе 5.

При отрицательном результате – возврат на производство.

8. Входной контроль средств измерений пользователем или оптовым покупателем (дистрибьютор, торговая организация) в целях предпродажной подготовки.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем: обеспечения необходимыми рабочими эталонами и другим необходимым оборудованием надзора и контроля за состоянием рабочих эталонов; организации и выполнения входного метрологического контроля в соответствии с разделом ТУ или отдельным документом “Методика поверки (калибровки)”, утвержденным на этапе 5.

При отрицательном результате – предъявление рекламации изготовителю.

10. Применение средства измерений.

Метрологическое обеспечение этого этапа осуществляется путем: разработки методик выполнения измерений в соответствии с ГОСТ 8.467 “Государственная система обеспечения единства измерений. Нормативно-технические документы на методики выполнения измерений. Требования к построению, содержанию и изложению” и МИ 2377 “Государственная система обеспечения единства измерений. Разработка и аттестация методик выполнения измерений” с учетом рекомендации МИ 1967 “Государственная система обеспечения единства измерений. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения”;

прогнозирования характеристик погрешностей результатов измерений, получаемых по этим методикам;

выбора на основании полученного прогноза подходящих средств измерений с учетом рекомендации МИ 1967;

оценки характеристик погрешностей результатов измерений.

11–13. Операции надзора за состоянием средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении выполняются путем поверки или калибровки в соответствии с разделом ТУ или документом “Методика поверки (калибровки)” утвержденном на этапе 5.

При отрицательном исходе любой из этих процедур средство измерений изымается из применения и может быть либо утилизировано, либо отправлено в ремонт.

11. *Периодическая поверка (калибровка)* – поверка (калибровка) средств измерений, находящихся в эксплуатации или на хранении, выполняемая через установленные межповерочные интервалы времени.

При положительном исходе поверки (калибровки) на средство измерений наносится *поверительное клеймо* с указанием срока очередной периодической поверки и может быть составлен сертификат поверки.

Межповерочные интервалы устанавливаются на этапе 5. Длительность межповерочного интервала в зависимости от фактической стабильности свойств средств измерений может быть установлена от нескольких месяцев до нескольких лет. В соответствии с документом № 10 МОЗМ и РМГ 74–2004 "ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений" длительность межповерочного интервала может быть изменена с учетом состояния средства измерения, регистрируемого при периодических и иных поверках.

12. *Внеочередная поверка (калибровка)* – поверка (калибровка) средства измерений, проводимая до наступления срока его очередной периодической поверки.

Выполняется при замеченном ухудшении метрологических свойств средства измерений или при подозрении в этом, при нарушении условий эксплуатации, при повреждении поверительного клейма, после ремонта и (или) регулировки) и т.п.

13. *Инспекционная поверка* – поверка, проводимая органом государственной метрологической службы при проведении государственного надзора за состоянием и применением средства измерений.

14. Ремонт и (или) регулировка средства измерений.

После этого этапа средство измерений направляется на этап 12.

## **5. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ, СВОЙСТВА**

### **5.1. Общие характеристики и обозначения**

Аналоговые электромеханические электроизмерительные приборы, как правило, обеспечивают выполнение прямых измерений, отсчет результата измерений производится по шкале. Режим измерений, выполняемых аналоговыми средствами измерений, статический. Большинство аналоговых измерительных приборов стрелочные, с неподвижной шкалой и подвижной стрелкой, перемещение которой (поворот или линейное перемещение) относительно шкалы функционально взаимно-однозначно связано со значением измеряемой величины.

Другие разновидности аналоговых электроизмерительных приборов: с неподвижной стрелкой или иным указателем и подвижной шкалой; с линейным индикатором в виде совмещенной со шкалой полосы, длина которой функционально взаимно однозначно связана со значением измеряемой величины (например, ртутный термометр).

Рассмотрим метрологическую структурную схему измерений, выполняемых стрелочным измерительным прибором, представленную на рис. 26.

По сравнению с метрологической структурной схемой, представленной на рис. 8, здесь в составе погрешности применения отсутствует погрешность, вызванная пульсациями и помехами, которые наложены на измеряемую величину и однородны с ней. Это вызвано тем, что механизм, перемещающий стрелку относительно шкалы или, наоборот, шкалу относительно стрелки, обладает значительной инерционностью: время установления показаний прибора равно примерно 1 с. Поэтому высокочастотные пульсации и помехи, действующие на большинстве объектов, фильтруются почти полностью.

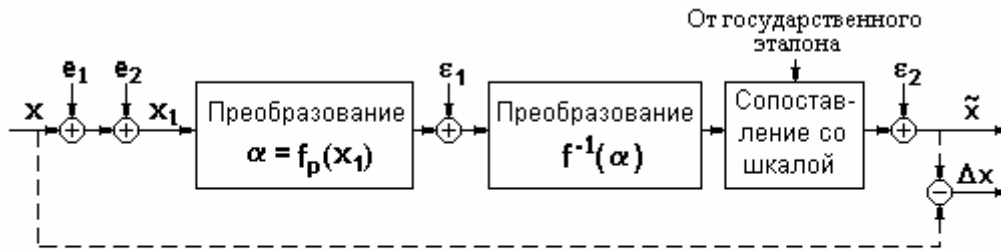


Рис. 26. Метрологическая структурная схема измерений, выполняемых стрелочным измерительным прибором

Примеры погрешностей  $e_1$  и  $e_2$  приведены ранее, в разделах 2.2, 3.1.2.

В стрелочном приборе измеряемая величина преобразуется в угол поворота стрелки (или в перемещение шкалы) с некоторой погрешностью  $\varepsilon_1$ . Обратное преобразование и совмещение со шкалой осуществляется за счет того, что отметки на шкале наносятся в соответствии с номинальной обратной функцией  $f^{-1}(\alpha)$  и оцифровываются в единицах измеряемой величины. Перенос размера измеряемой величины на шкалу выполняется путем подачи на вход прибора образцовых значений измеряемой величины от специального источника (меры или калибратора), связанного с государственным эталоном через поверочную схему (см. раздел 4.6.4). Эти действия также сопровождаются погрешностями, которые обозначены  $\varepsilon_2$ .

В нормативной и сопроводительной документации на аналоговые электроизмерительные приборы приводятся нормы, устанавливаемые на следующие метрологические характеристики:

диапазон изменения измеряемой величины;

предел допускаемой основной приведенной погрешности (fiducial error), выражается в %%;

собственное сопротивление, или импеданс (нормируется только для электроизмерительных приборов);

предел допускаемой дополнительной погрешности (выражается в долях (обычно 0,5 или 1,0) от предела допускаемой основной приведенной погрешности и нормируется для каждой влияющей величины отдельно).

Основная погрешность (intrinsic error) аналоговых измерительных приборов нормируется без деления на мультипликативную и аддитивную составляющие. Случайная составляющая погрешности подобных при-

боров практически отсутствует, если не учитывать возможного случайного характера погрешности от трения подвижных частей.

При установлении нормы на приведенную погрешность считают, что абсолютная погрешность средства измерений неизменна, и в качестве таковой принимают наибольшее ее значение в диапазоне измерений. Это значение абсолютной погрешности  $\Delta$  приводится к некоторому условному нормирующему значению (fiducial value) измеряемой величины  $x_{\text{норм}}$ , и для него во всем диапазоне изменения измеряемой величины устанавливается предел допускаемых значений

$$\left| \frac{\Delta}{x_{\text{норм}}} \right| 100\% \leq \gamma_{\text{прив}},$$

откуда следует, что основная абсолютная погрешность средства измерений, признанного пригодным к применению, в любой точке диапазона измерений должна удовлетворять неравенству

$$|\Delta| \leq \frac{\gamma_{\text{прив}}}{100} |x_{\text{норм}}|$$

В зависимости от типа прибора, диапазона значений измеряемых величин, от принципа действия и от состава погрешностей нормирующие значения могут быть выбраны из числа следующих:

$x_{\text{норм}} = |x_{\text{max}}|$  (модуль максимального значения в диапазоне измерения),

$x_{\text{норм}} = |x|$  (модуль текущего значения измеряемой величины),

$x_{\text{норм}} = |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$  (ширина диапазона значений измеряемой величины),

Аналоговым измерительным приборам с непосредственным отсчетом присваивается *класс точности* (class index), который обозначается числом, равным пределу допускаемой основной приведенной погрешности  $\gamma_{\text{прив}}$ . Стандартом ГОСТ 8.401 “Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования” предписывается выбирать значение  $\gamma_{\text{прив}}$  из следующего ряда:

$1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $(1,6 \cdot 10^n)$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $(3 \cdot 10^n)$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ , где  $n = 1, 0, -1, -2, \dots$ . Значения, указанные в скобках, не рекомендованы и используются в порядке исключения. Обозначение класса точности прибора обычно изображается на шкале или лицевой панели прибора различным образом в зависимости от принятого для приборов данного типа нормирующего значения:

- 1,5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности, которая определена при нормирующем значении  $x_{\text{норм}} = |x|_{\text{max}}$  (нормируется, если мультипликативная составляющая погрешности мала по сравнению с аддитивной составляющей); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{\text{инст}}| \leq \frac{\gamma_{\text{СИ}} |x|_{\text{max}}}{100},$$

где  $\gamma_{\text{СИ}}$  – численное обозначение класса точности средства измерения.

- ①,5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной относительной погрешности которая определена при нормирующем значении  $x_{\text{норм}} = |x|$  (нормируется, если аддитивная составляющая погрешности мала по сравнению с мультипликативной составляющей); это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{\text{инст}}| \leq \frac{\gamma_{\text{СИ}} |x|}{100},$$

где  $\gamma_{\text{СИ}}$  – численное обозначение класса точности средства измерения,  $x$  – результат измерения.

**1,5** - обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности которая определена при нормирующем значении  $x_{\text{норм}} = |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$  (нормируется, когда нулевое значение измеряемой величины находится либо внутри диапазона, либо вне его); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{\text{инст}}| \leq \frac{\gamma_{\text{СИ}} |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|}{100},$$








где  $\gamma_{\text{СИ}}$  – численное обозначение класса точности средства измерения. В приведенном примере  $|\Delta_{\text{инст}}| \leq 0.015 |x_{\text{max}} - x_{\text{min}}|$ .

**1,5** – обозначение класса точности прибора (только аналогового омметра), численно равное пределу основной приведенной погрешности, которая определена, как выраженное в процентах отношение длины участка шкалы  $\Delta l$  [мм], соответствующего максимальной абсолютной погрешности, к общей длине шкалы  $L$  [мм] (см. п. 3.4).

Примеры практического применения последнего выражения нормы, которая устанавливается на основную погрешность аналогового омметра, приведены в лабораторном практикуме.

Кроме класса точности на шкалах приборов наносятся следующие обозначения:

*Обозначения системы прибора:*

-  прибор магнитоэлектрической системы,
-  прибор магнитоэлектрической системы с выпрямителем,
-  прибор электродинамической системы,
-  прибор ферродинамической системы,
-  прибор электромагнитной системы,
-  прибор электростатической системы,
-  прибор индукционной системы.

*Обозначения вида тока (напряжения)*



- — постоянный ток (напряжение),
- ~ — переменный ток (напряжение),
- ⎓ — постоянный и переменный ток (напряжение),

### *Другие обозначения*

- ⊥ — нормальное рабочее положение прибора вертикальное (на щите),
- — нормальное рабочее положение прибора горизонтальное,
- ☆ — испытательное напряжение прочности изоляции 500 В,
- ☆<sub>2</sub> — испытательное напряжение, превышающее 500 В (здесь 2 кВ),
- ☆<sub>0</sub> — прибор не подлежит испытанию прочности изоляции,
- ⚠ — перед использованием прибора внимательно изучить инструкцию по его эксплуатации,
- ⚡ — зажим не изолирован от высокого напряжения,
- ⊥ — зажим соединен с корпусом, не заземляется,
- ⏚ — зажим соединен с корпусом, заземляется.

Единственная динамическая характеристика, которую необходимо нормировать для аналоговых приборов—это время установления показаний, то есть время реакции, которое для всех подобных приборов устанавливается по умолчанию равным 1 с, обеспечивается конструкцией прибора и специально не указывается.

## **5.2. Приборы магнитоэлектрической системы**

### **5.2.1. Принцип действия, уравнение движения подвижной части**

Приборы магнитоэлектрической системы (или иначе – магнитоэлектрические приборы) являются самыми распространенными стрелочными электроизмерительными приборами. Эти приборы обладают высокой чувствительностью и не только применяются, как самостоятельные приборы

для измерения силы тока и напряжения, но и встраиваются в другие, более сложные приборы, снабженные измерительными преобразователями различного назначения, принципа действия и исполнения.

Принцип действия магнитоэлектрического прибора (далее – МЭ-прибора) основан на взаимодействии проводника с током и магнитного поля. На рис. 27 представлен схематический чертеж МЭ-прибора с примером возможных надписей на его шкале. Обозначение типа отечественных приборов содержит сведения о системе ('М' – магнитоэлектрический) и о заводе-изготовителе (первая цифра – шифр завода-изготовителя, например, '1' – завод "Вибратор").

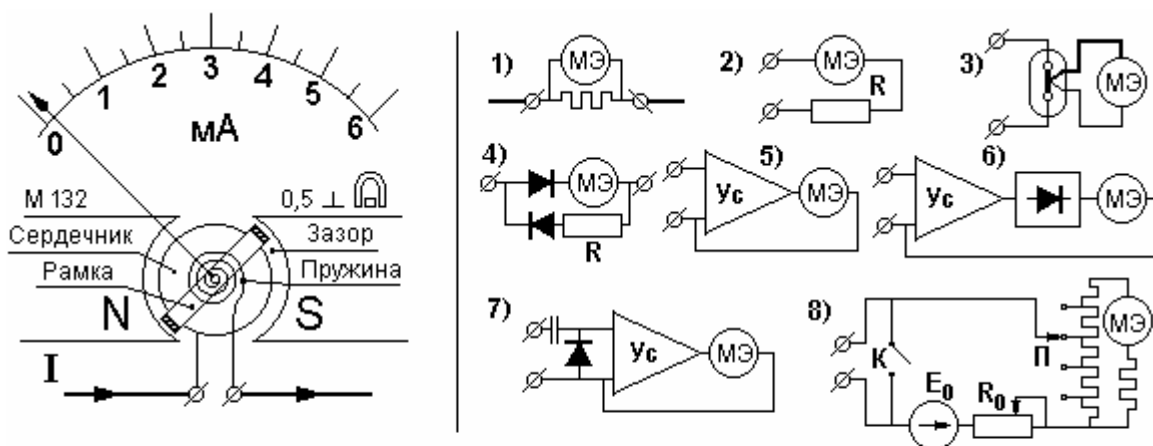


Рис. 27. Приборы магнитоэлектрической системы, принцип действия, варианты применения

Магнитное поле создается постоянным магнитом, прошедшим стабилизацию. Между полюсами магнита расположен сердечник таким образом, чтобы воздушный зазор, в котором движется рамка с обмоткой, был равномерным. В обмотку рамки через пружинки или иные упругие элементы, например, растяжки, поступает ток  $I$ , и в результате его взаимодействия с постоянным магнитным полем возникает вращающий момент  $M_{вр} = BS\omega I$ , где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре,  $S$  – площадь обмотки рамки,  $\omega$  – число витков обмотки рамки. Вращающему моменту противодействует момент, создаваемый пружинкой или растяжкой, который в пределах упругих деформаций этих элементов линейно зависит от

угла поворота рамки  $\alpha$ :  $M_{\text{ПР}} = W\alpha$ , где  $W$  – жесткость пружинки (растяжки). В установившемся состоянии, когда  $M_{\text{ВР}} = M_{\text{ПР}}$ ,

$$\alpha = \frac{BSw}{W} I$$

с такой точностью, которая обеспечивается стабильностью индукции магнитного поля в зазоре и жесткости пружинки (растяжки). Современные технологии изготовления и стабилизации магнитов и упругих элементов позволяют достигать значений основной приведенной погрешности МЭ-приборов вплоть до 0.1 %.

Поскольку угол поворота рамки и, значит, стрелки линейно зависит от тока в рамке, шкалы автономно применяемых МЭ-приборов равномерные.

В переходном режиме, когда ток в рамке изменяется, движение подвижной части прибора (рамки и стрелки) описывается дифференциальным уравнением второго порядка, как колебательной системы, имеющей инерционную массу и жесткость:

$$J\alpha'' + P\alpha' + W\alpha = BSwi(t). \quad (25)$$

В таком режиме противодействующий момент увеличивается на момент инерции  $J\alpha''$  и на момент сопротивления  $P\alpha'$ , пропорциональный скорости движения рамки.

Этот момент для МЭ-приборов складывается из момента сопротивления воздуха и момента торможения, вызванного током, возбужденным перемещением обмотки рамки в магнитном поле (аналогично рекуперативному торможению электрического двигателя). Указанное свойство МЭ-приборов используют для предохранения стрелки от повреждений при транспортировании путем закорачивания обмотки рамки. В этом случае ток, возбужденный в обмотке рамки при тряске и ударах, будет максимальным, следовательно, торможение стрелки тоже максимально.

Предельно достижимые значения параметров МЭ-приборов:

предел допускаемой основной приведенной погрешности – от 0.1%;

ток полного отклонения стрелки от 10 мкА.

В силу таких высоких показателей МЭ-приборы имеют широкое применение.

### 5.2.2. Простейшие применения магнитоэлектрических приборов

Некоторые варианты применения МЭ-приборов представлены на рис. 27 справа. Рассмотрим эти варианты подробнее.

1. Использование в качестве амперметра со стандартными шунтами, падение напряжения на которых 10, 45, 75 мВ. Пределы измерения постоянного тока от  $3 \cdot 10^{-7}$  А (гальванометры) до 10 000 А (с шунтом). Основная приведенная погрешность – от 0.2%.

2. Вольтметр постоянного тока с добавочным сопротивлением  $R$ . Высокая чувствительность МЭ-приборов позволяет достичь довольно высокого сопротивления подобных вольтметров. Так, при токе полного отклонения стрелки прибора 10 мкА сопротивление вольтметра на основе МЭ - прибора составит 100 000 Ом/В, а при диапазоне измерений  $[0 \div 10]$  В собственное сопротивление вольтметра составит 1.0 МОм. Такое высокое сопротивление вольтметра обеспечивает благоприятные условия взаимодействия с объектом (см. раздел 2.2).

Пределы измерений от 1 В до  $1 \cdot 10^3$  В. Основная приведенная погрешность от 0.2 %.

3. Амперметры с термопреобразователем (рис. 27, 3) для измерения действующего значения переменного тока в пределах от 0.005 до 100 А (с трансформатором тока) в частотном диапазоне до  $10^8$  Гц с погрешностью от 1 %. Измеряемый ток поступает в термопреобразователь, который представляет собой баллон, заполненный инертным газом и внутри него расположен проводник, нагреваемый измеряемым током, и термопары. Температура проводника определяется выделяемой в нем активной мощностью измеряемого тока, то есть действующим значением тока. До этой же температуры нагревается горячие спаи термопар. Возникающая термоЭДС в силу замкнутости цепи вызывает в ней постоянный ток, который измеряется МЭ-прибором.

4. Выпрямительный амперметр. Диоды, показанные на рис. 27, 4), включены в противоположных направлениях для того, чтобы включение такого амперметра в исследуемую цепь не приводило к выпрямлению тока

в этой цепи. Сопротивление  $R$  должно быть равно сопротивлению рамки прибора, а ток в цепи должен оставаться переменным.

Пределы измерений от  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$  до  $10^4 \text{ А}$  (с трансформатором тока). Основная приведенная погрешность от 1.5 %. Показания выпрямительного амперметра пропорциональны средневыпрямленному значению.

5. Аналоговый омметр. На рисунке 8) показаны:

$E_0$  – внутренний источник постоянного напряжения,

П – переключатель пределов измерения,

К – ключ, замыкание которого имитирует нулевое значение измеряемого сопротивления, при замкнутом ключе К с помощью переменного сопротивления  $R_0$  устанавливается электрический 0 шкалы омметра, которому соответствует ток полного отклонения стрелки МЭ-прибора.

После установки нуля ключ К размыкается, и выполняется измерение сопротивления  $R_x$ . Очевидно, что при  $R_x = \infty$  ток через МЭ-прибор не течет, стрелка не отклоняется, и отметка ‘ $\infty$ ’ оказывается на левой границе шкалы сопротивлений омметра.

Пределы измерения – от единиц Ом до сотен тысяч Ом. Основная приведенная погрешность – не лучше, чем 1.5 % .

### 5.2.3. Применение в составе аналоговых электронных приборов

Ниже рассмотрены варианты применения МЭ-приборов в составе электронных средств измерений.

1. Упрощенная схема высокочувствительных электронных аналоговых амперметров и вольтметров постоянного тока и напряжения с усилителем приведена на рис. 27, 5). Используемые здесь усилители помимо повышения чувствительности обеспечивают благоприятные условия взаимодействия с объектом измерений (см. раздел 2.2) за счет того, что входное сопротивление усилителя тока (для амперметра) может быть сделано пренебрежимо малым, а входное сопротивление усилителя напряжения (для вольтметра), напротив, – очень большим до  $10^{10}$  Ом.

Пределы измерений силы тока – от  $5 \cdot 10^{-10}$  до 1.0 А, напряжения – от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $10^3$  В. Основная приведенная погрешность от 1.5 %.

2. Упрощенная схема высокочувствительных электронных амперметров и вольтметров, предназначенных для измерения параметров переменного тока и напряжения, приведена на рис. 27, б). В этих приборах, как и в предыдущих, усилитель выполняет одинаковые функции. Кроме того, здесь могут быть предусмотрены частотные фильтры, обеспечивающие фильтрацию измеряемого (исследуемого) сигнала.

Пределы измерений силы тока – от  $10^{-5}$  до 1.0 А, напряжения – от  $3 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^2$  В. Основная приведенная погрешность амперметров и вольтметров от 1.5 %.

Недостаток выпрямительных амперметров и вольтметров переменного тока: угол отклонения стрелки МЭ-прибора пропорционален постоянной составляющей выпрямленного тока, но все такие приборы градуируются в действующих значениях тока и напряжения. Это означает, что указанные характеристики инструментальной погрешности подобных приборов справедливы только для той формы кривой тока или напряжения, для которой выполнена градуировка, а именно, для синусоидальной. Погрешность, вызванная отличием формы кривой от синусоидальной, может достигать 11 %, что соответствует максимальному значению коэффициента формы кривой.

3. Упрощенная схема амплитудного электронного вольтметра представлена на рис. 27, 7). Входная цепь, состоящая из конденсатора и диода (схема фиксатора), при высоком входном сопротивлении усилителя обеспечивает выделение на диоде пульсирующего напряжения с постоянной составляющей, примерно равной двойной амплитуде измеряемого напряжения. Это происходит потому, что конденсатор, зарядившись до амплитудного значения напряжения, в следующий полупериод запирает диод и тем самым поднимает входное напряжение на величину его амплитуды. Погрешность такого преобразования вызывается частичным разрядом конденсатора на входное сопротивление усилителя.

#### **5.2.4. Магнитоэлектрические кулонометры и веберметры**

1. Магнитоэлектрический кулонометр. Чтобы на основе МЭ-прибора создать прибор для измерения заряда, следует уменьшить, по возможности, момент инерции подвижной части и противодействующий момент. Поэтому у кулонометров отсутствуют пружинки (растяжки), ток в обмотку рамки подается через безмоментные подводы, а подвижная часть максимально облегчена. Тогда в идеальном случае уравнение движения подвижной части кулонометра есть частный случай уравнения (25):

$$P\alpha'(t) = BSwi(t),$$

откуда, по определению тока, как скорости изменения заряда, получим

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = \frac{BSw}{P} i(t), \quad \alpha(t_2) - \alpha(t_1) = \frac{BSw}{P} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{BSw}{P} q, \quad (26)$$

где  $[t_1, t_2]$  – интервал времени, в течение которого измеряемый заряд проходил через обмотку рамки.

Результат измерения отсчитывается по шкале прибора в кулонах как разница двух положений стрелки в момент времени присоединения к объекту и в момент завершения разряда объекта через обмотку рамки. В связи с таким действием МЭ кулонометр снабжается устройством принудительной установки стрелки в некоторое начальное положение перед каждым измерением.

2. Магнитоэлектрический веберметр. Предназначен для измерения разности потокосцепления исследуемого постоянного магнитного поля с испытательной катушкой веберметра, площадь которой  $S$  и число витков  $w_{в\epsilon\delta}$  известны. Он устроен и действует точно так же, как МЭ-кулонометр.

Плоская катушка с числом витков  $w_{в\epsilon\delta}$ , присоединенная к зажимам веберметра, перемещается из одной точки исследуемого магнитного поля в другую. Пусть  $\Phi_1, \Phi_2$  – магнитные потоки в двух точках поля, тогда  $\Psi_1 = w_{в\epsilon\delta} \Phi_1$  и  $\Psi_2 = w_{в\epsilon\delta} \Phi_2$  – потокосцепления в этих точках. ЭДС и, соответственно, ток, индуцирующиеся в катушке при ее перемещении из точки к точке, вычисляются через производную от потокосцепления по времени. В частности,

$$i(t) = \Psi'(t) / R, \quad (27)$$

где  $R$  - сопротивление цепи.

Подставляя выражение (27) в формулы, записанные выше для кулонометра, получим:

$$\frac{d\alpha(t)}{dt} = \frac{BSw}{P} i(t) = \frac{BSw}{PR} \Psi'(t), \quad \alpha(t_2) - \alpha(t_1) = \frac{BSw}{PR} \int_{t_1}^{t_2} \Psi'(t) dt = \frac{BSw}{PR} (\Psi_2 - \Psi_1).$$

Таким образом, для измерения разности между магнитными потоками (или потокосцеплениями) в двух точках магнитного поля необходимо установить стрелку веберметра в некоторое положение, затем присоединить к нему плоскую катушку с известной площадью и числом витков и переместить ее между этими точками магнитного поля. Стрелка веберметра изменит свое положение, и результатом измерения будет разность положений стрелки, отсчитанная в единицах магнитного потока.

Пределы измерений – от 500 до  $10^4$  мкВб. Основная приведенная погрешность от 1.5 %.

### 5.3. Приборы электродинамической системы

Принцип действия приборов электродинамической системы (в дальнейшем ЭД-приборов) и пример обозначений на шкале представлены на рис. 28.

Вращающий момент создается в результате взаимодействия токов, протекающих в подвижной и неподвижной катушках. Этот момент пропорционален произведению мгновенных значений токов:

$$M_{\text{ВР}}(t) = K_{\text{ЭД}} i_1(t) i_2(t).$$

Момент инерции подвижной части прибора (катушки и стрелки) достаточно велик, и поэтому она не успевает реагировать на быстрые изменения токов, то есть является простым механическим низкочастотным фильтром. Поскольку эти приборы, как правило, предназначены для измерения характеристик периодических сигналов, то постоянная составляющая вращающего момента записывается в виде среднего значения

$$\bar{M}_{\text{ВР}} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i_1(t) i_2(t) dt,$$

где  $T$  - период сигналов тока  $i_1(t), i_2(t)$ ,  $K_{\text{ЭД}}$  - постоянный коэффициент.



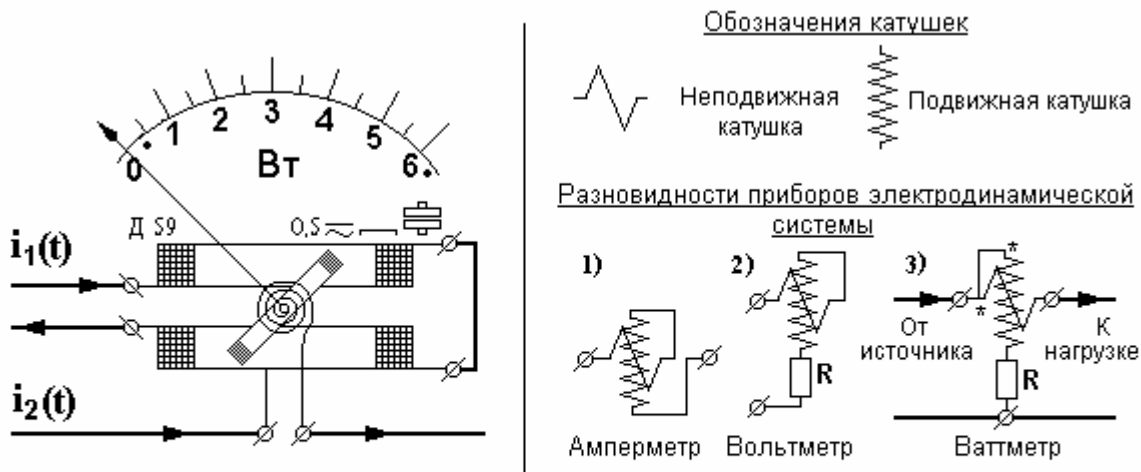


Рис. 28. Приборы электродинамической системы. Принцип действия, обозначения, варианты применения

На основе механизма электродинамической системы создаются амперметры, вольтметры и ваттметры (см. схемы 1, 2, 3 рис. 28).

1. ЭД амперметр. Через обе катушки течет один и тот же ток, поэтому среднее значение вращающего момента пропорционально действующему значению измеряемого тока вне зависимости от формы кривой тока:

$$\bar{M}_{\text{вр}} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt. \quad (28)$$

Из формулы (28) следует, что ЭД амперметр позволяет измерять постоянный ток и действующее значение переменного тока, о чем свидетельствует специальный знак на шкале. Вследствие значительной индуктивности катушек частотный диапазон ЭД амперметров ограничен сверху значением 5000 Гц. В связи с этим при наличии в кривой тока высокочастотных составляющих, которые превышают частотный диапазон прибора, все-таки появляется незначительная зависимость результатов измерений от формы кривой.

Предельные свойства ЭД амперметров.

предел допускаемой основной приведенной погрешности – от 0.2% до 1.0%;

диапазон измерений – от 0.005 А и выше, с трансформатором тока - до 6 000 А;

диапазон частот – 0; 45 – 5000 Гц;

собственное сопротивление не более нескольких Ом.

Шкала ЭД – амперметра неравномерна. Конструктивными мерами путем подбора формы катушек ее стремятся сделать равномерной. На шкалах отечественных ЭД амперметров обычно нанесены жирные точки, за пределами которых объявленный класс точности не обеспечивается.

2. ЭД вольтметр. ЭД вольтметр используется для измерения постоянного и действующего значений переменного напряжения практически вне зависимости от формы кривой, если частоты высших гармоник кривой напряжения не выходят за пределы его частотного диапазона. Из-за большого потребляемого тока (5 мА) сопротивление ЭД вольтметра не может быть большим. Так, на пределе 50 В его сопротивление не может быть больше 10000 Ом. Поэтому ЭД вольтметры применяются для измерений в мощных цепях, в которых шунтирующее действие их невысокого сопротивления не будет заметно отражаться на результатах измерений.

Предельные свойства ЭД вольтметров.

предел допускаемой основной приведенной погрешности – от 0.2 % до 1.0 %;

диапазон измерений – от 5 до 600 В, с трансформатором – до  $3 \cdot 10^4$  В.

диапазон частот – до 5000 Гц,

собственное сопротивление – в зависимости от предела измерения.

Свойства шкал ЭД вольтметров такие же, как у шкал ЭД амперметров.

3. ЭД ваттметр. Предназначен для измерения мощности, выделяемой постоянным и переменным током в нагрузке. Ток нагрузки, который может достигать десятков ампер, проходит через неподвижную катушку, называемую *последовательной цепью ваттметра*. Через подвижную катушку (*параллельную цепь ваттметра*) пропускается ток, пропорциональный напряжению, подаваемому от источника. Для периодических сигналов с учетом сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением выражение для среднего вращающего момента имеет вид:

$$\bar{M}_{\text{ВР}} = \frac{K_{\text{ЭД}}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \frac{u(t + \varphi)}{R} dt = \frac{K_{\text{ЭД}}}{R \cdot T} \int_t^{t+T} I \sin(\omega t) U \sin(\omega t + \varphi) dt =$$

$$= K_{\text{ВТ}} \frac{UI}{2T} \left[ \int_t^{t+T} \cos(\varphi) dt - \int_t^{t+T} \cos(2\omega t + \varphi) dt \right] = K_{\text{ВТ}} I_{\text{Д}} U_{\text{Д}} \cos \varphi. \quad (29)$$

В полученном результате обозначено:  $U, I, U_{\text{Д}}, I_{\text{Д}}$  - амплитудные и действующие значения напряжения и тока напряжения,  $K_{\text{ВТ}}$  - постоянный коэффициент.

Первый из интегралов (29) равен  $T \cos \varphi$ , второй равен нулю, как интеграл от периодической функции на интервале, равном двум периодам.

Из выражения (29) видно, что вращающий момент и, следовательно, угол отклонения стрелки электродинамического ваттметра прямо пропорционален активной мощности. Поэтому шкала электродинамического ваттметра линейна.

Зажимы ваттметра, помеченные звездочкой, как это показано на рис. 28 в), присоединяются к проводам, идущим от источника, и потому эти зажимы называются *генераторными*.

Предельные свойства электродинамических ваттметров.

предел допускаемой основной приведенной погрешности от 0,2 %;

пределы измерения от единиц ватт до  $10^8 \div 10^{10}$  Вт (с трансформаторами тока и напряжения).

диапазон частот – 45 ÷ 5000 Гц.

#### 5.4. Приборы ферродинамической системы

Назначение, схемы включения и принцип действия приборов ферродинамической системы – такие же, что и у электродинамических приборов. Как видно из рис. 29, конструктивное различие заключается в том, что в целях усиления электромагнитного поля неподвижной катушки она снабжена магнитопроводом из листовой наборной электротехнической стали. По аналогии с МЭ-приборами, магнитопровод снабжен наконечниками и для уменьшения магнитного сопротивления – сердечником, так что для подвижной катушки обеспечивается равномерный воздушный зазор.

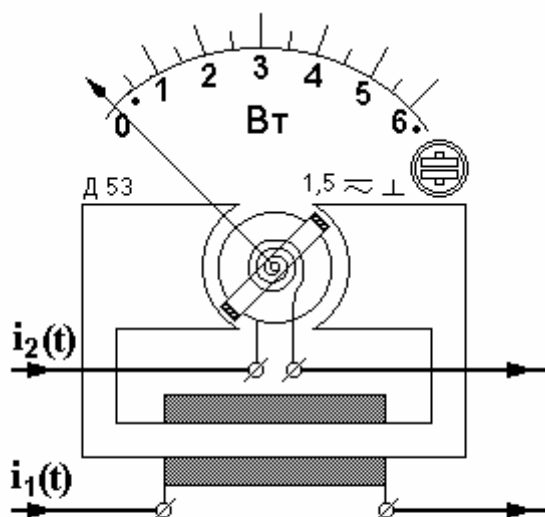


Рис. 29. К принципу действия прибора ферродинамической системы

Благодаря этому вращающий момент ФД-приборов существенно увеличен, а вся магнитная система оказывается экранированной от действия внешних магнитных полей, которые могут возникать на энергоёмких предприятиях, особенно в местах расположения приборных щитов. Поэтому чаще всего ФД-приборы применяются как щитовые приборы для вертикального расположения. Благодаря большому вращающему моменту ФД-приборы устойчивы к тряске и вибрациям и успешно применяются

на железнодорожных, морских и воздушных транспортных средствах. Стрелка, шкала и иные индикаторы ФД-приборов обычно выполняются хорошо видимыми с обычного расстояния от щита 1.0 – 2.5 м, за которым следит технолог, управляющий производственным процессом.

Однако наличие магнитопровода значительно увеличивает индуктивность неподвижной катушки, и поэтому частотный диапазон ФД-приборов существенно уже частотного диапазона ЭД-приборов.

Диапазоны измерений действующих значений тока, напряжения и активной мощности те же, что и у ЭД-приборов. Точность ФД-приборов ниже и не бывает лучше, чем 0.5 %. Частотный диапазон 0 Гц, 45 – 500 Гц. Собственное сопротивление ФД вольтметров составляет (100 – 2000) Ом. Большое значение вращающего момента дает возможность использовать ФД-механизм для построения самопишущих приборов. Для этого на стрелке устанавливается пишущий инструмент (перо, чернильница), и в прибор встраивается лентопотяжный механизм, перемещающий бумажную ленту.

## 5.5. Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы (далее ЭМ-приборы) поясняется рис. 30, на котором приведены типичные надписи на шкале. Вращающий момент создается за счет того, что ток  $i(t)$ , протекающий по катушке, выполненной как соленоид со щелевидным отверстием, создает электромагнитное поле, которое втягивает внутрь катушки фигурную пластину, изготовленную из электротехнической стали. Этот момент пропорционален квадрату силы тока и поэтому содержит постоянную и переменную составляющие.

Частота первой гармоники переменной составляющей равна удвоенной частоте первой гармоники измеряемой силы тока. В силу инерционности подвижной части переменная составляющая фильтруется, и средний вращающий момент равен

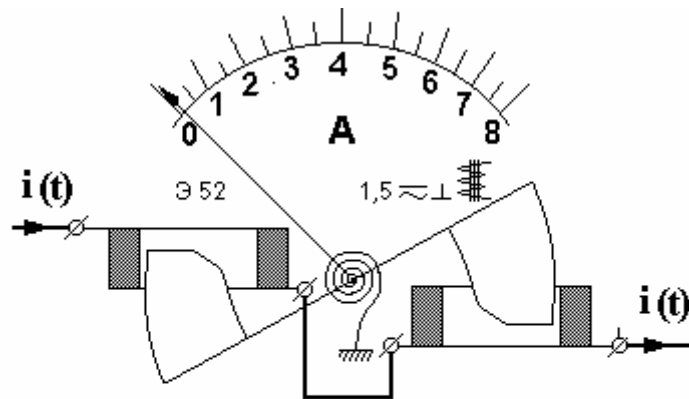


Рис. 30. К принципу действия прибора электромагнитной системы

$$\bar{M}_{\text{ВР}} = \frac{K_{\text{ЭМ}}}{T} \int_t^{t+T} i^2(t) dt, \quad (30)$$

где  $T$  – период измеряемого тока,  $K_{\text{ЭМ}}$  – постоянный коэффициент.

Из выражения (30) следует, что ЭМ-приборы позволяют измерять действующее значение переменного тока, а также силу постоянного тока, о чем свидетельствует также соответствующий знак на шкале.

Из принципа действия ЭМ-приборов следует, что на его показания могут оказывать сильное воздействие внешние магнитные поля. Чтобы уменьшить их действие, в ЭМ-приборах предусматривается дифференциальная конструкция, как это показано на рис. 30. Компенсация действия внешнего поля происходит за счет того, что моменты, которые оно создает при воздействии на обе стороны подвижной части, действуют в противоположных направлениях, а моменты, создаваемые измеряемым током, – в одном направлении. Эта компенсация будет неполной, если внешнее поле неоднородно в объеме подвижного механизма прибора.

На рис. 30 показан ЭМ амперметр. ЭМ вольтметр получается присоединением к ЭМ амперметру последовательно добавочного резистора.

В силу квадратичной зависимости вращающего момента от силы тока шкала ЭМ-приборов неравномерна. Равномерности шкалы на рабочей части добиваются путем подбора формы пластин, втягивающихся в катушку.

Метрологические и эксплуатационные свойства ЭМ-приборов невысоки. Ток полного отклонения стрелки не менее 5 мА, предел допускаемой основной приведенной погрешности не менее 0.5%, частотный диапазон составляет 0 Гц и 40 – 3000 Гц. Собственное сопротивление ЭМ вольтметров составляет (100 – 2000) Ом.

Достоинством ЭМ-приборов является отсутствие токоподводов к подвижной части, низкая трудоемкость в изготовлении, низкая стоимость используемых материалов и, следовательно, пониженная цена по сравнению с другими приборами, имеющими равные метрологические свойства.

Основное применение – в качестве щитовых приборов, в том числе на транспортных средствах.

## 5.6. Приборы электростатической системы

Действие электростатического прибора (далее ЭС-прибора) основано на использовании силы, возникающей между пластинами воздушного конденсатора, заряды на которых имеют разные знаки. Схематический чертеж ЭС-прибора представлен на рис.31. Измеряемое напряжение  $u(t)$  прикладывается к неподвижным и подвижным пластинам, которые под действием указанной силы втягиваются в пространство между неподвижными пластинами. Вращающий момент пропорционален квадрату напряжения и поэтому содержит постоянную и переменную составляющие. Частота первой гармоники переменной составляющей в два раза больше частоты первой гармоники измеряемого напряжения. В силу инерционности подвижной части переменная составляющая вращающего момента фильтруется, и подвижная часть отклоняется на угол, пропорциональный постоянной составляющей, то есть среднему значению вращающего момента:

$$\bar{M}_{\text{ВР}} = \frac{K_{\text{ЭС}}}{T} \int_t^{t+T} u^2(t) dt ,$$

где  $T$  – период измеряемого тока,  $K_{ЭС}$  – постоянный коэффициент.

Устройство и принцип действия ЭС-прибора свидетельствуют о том, что ЭС-прибором может быть только вольтметр, обеспечивающий измерение постоянного напряжения и действующего значения переменного напряжения. ЭС вольтметр выделяется среди вольтметров всех систем, в том числе и электронных, своим экстремально высоким сопротивлением, которое при измерении постоянного напряжения равно сопротивлению изоляции. При измерении переменного напряжения собственное сопротивление ЭС вольтметра определяется его емкостью, не превышающей нескольких сот пикофард.

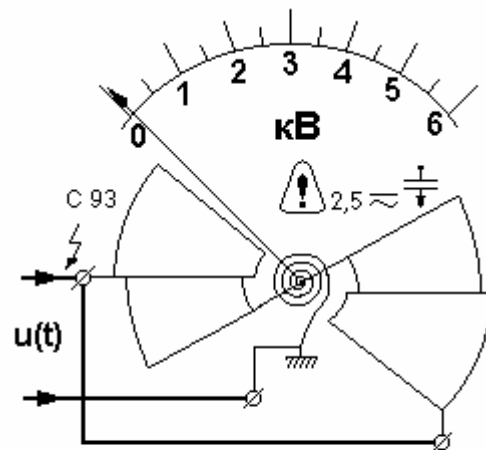


Рис. 31. К принципу действия прибора электростатической системы

Основным недостатком вольтметров электростатической системы является низкий вращающий момент, из-за чего диапазон измеряемых напряжений ограничен снизу значением 30 В, и данный вольтметр может применяться только при условии защиты от вибраций и тряски.

Вольтметры электростатической системы обеспечивают измерение высоких напряжений (до 300 кВ) без использования делителя напряжения и практически без собственного потребления мощности от объекта.

Достигнутый предел допускаемой основной приведенной погрешности ЭС вольтметров – 0.5%. Частотный диапазон: 0 Гц, 40 – 10<sup>7</sup> Гц.

## 5.7. Приборы индукционной системы

Единственной разновидностью приборов индукционной системы являются счетчики активной и реактивной электрической энергии переменного тока, потребляемой нагрузкой. Устройство счетчика электрической энергии схематически представлено на рис. 32. Подвижной частью этого прибора является диск из электропроводящего материала (обычно из алюминия, как обладающего наименьшим весом). Диск вращается на оси, за-

крепленной в подпятниках, которые должны быть износостойчивыми и создавать минимальный и неизменный во времени момент трения. Вращающий момент создается двумя электромагнитами, расположенными по

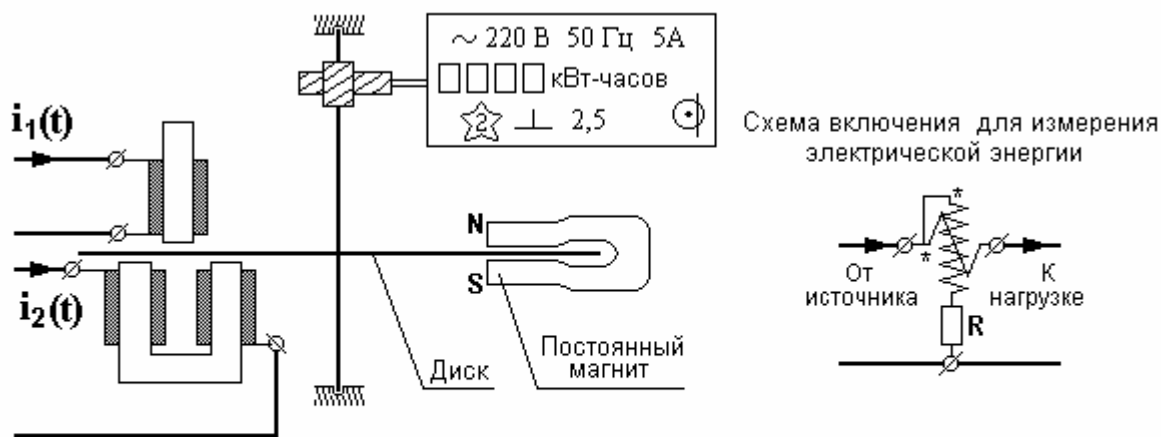


Рис. 32. Прибор индукционной системы (счетчик электрической энергии). Принцип действия, обозначения, схема включения

разные стороны от диска. Их расположение таково, что вихревые токи, создаваемые ими в диске, взаимодействуют с полями этих электромагнитов, и при этом взаимодействии возникает момент, пропорциональный произведению токов:

$$M_{\text{вр}}(t) = K_{\text{инд}} i_1(t) i_2(t).$$

Если в одном из электромагнитов протекает ток нагрузки (назовем эту цепь по аналогии с подобной цепью ЭД ваттметра *последовательной*, см. раздел 5.3), а в другом электромагните протекает ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, то есть  $i_2(t) = u(t) / R$  (назовем эту цепь *параллельной*, как соответствующую цепь ЭД ваттметра, см. раздел 5.3), где  $R$  – добавочное сопротивление параллельной цепи, то средний вращающий момент, как и в случае ЭД ваттметра, будет пропорционален активной мощности:

$$\bar{M}_{\text{вр}} = \frac{K_{\text{инд}}}{T} \int_t^{t+T} i(t) \frac{u(t + \varphi)}{R} dt = \frac{K_{\text{инд}}}{T} I_{\text{д}} U_{\text{д}} \cos \varphi = K_M,$$

где  $\varphi$  - угол сдвига фазы между током и напряжением в нагрузке.



Собственное сопротивление последовательной обмотки (тока) делают как можно меньше (десятые доли Ом), а сопротивление параллельной обмотки (напряжения) – как можно больше (единицы и десятки кОм).

Если бы противодействующий момент создавался пружинкой, то угол поворота диска был бы пропорционален мощности. Однако отсутствие противодействующей пружинки позволяет диску вращаться, то есть выполнять интегрирование угловой скорости его вращения. Если угловая скорость вращения диска пропорциональна мощности, то угол поворота диска (который индицируется индикатором с округлением до целого числа оборотов) пропорционален интегралу от мощности, то есть энергии. Для обеспечения этой пропорциональности противодействующий момент создается стабилизированным постоянным магнитом. Тормозной противодействующий момент возникает за счет того, что при движении диска в поле магнита в диске возникает ток, пропорциональный скорости его вращения, и этот ток взаимодействует с полем магнита, тормозя вращение, как это происходит при рекуперативном торможении электрического двигателя постоянного тока.

Равномерное вращение происходит в том случае, когда равны моменты: вращающий и противодействующий, то есть когда  $M_{\text{ВР}} = M_{\text{ПР}}$ . Поскольку вращающий момент пропорционален мощности  $P$ , а противодействующий пропорционален угловой скорости вращения  $\omega$ ,

$$M_{\text{ВР}} = M_{\text{ПР}} \omega + M_{\text{ТР}},$$

где  $M_{\text{ВР}}$ ,  $M_{\text{ПР}}$  – коэффициенты пропорциональности,  $M_{\text{ТР}}$  – момент трения в подпятниках.

Отсюда, пренебрегая моментом трения, получаем:

$$\omega = \frac{M_{\text{ВР}}}{M_{\text{ПР}}} m, \quad \alpha(t) = \int_0^t \omega dt = \frac{K_{\text{ВР}}}{K_{\text{ПР}}} \int_0^t P dt = K_{\text{ЭН}} A(t),$$

где  $\alpha(t)$  – угол поворота диска счетчика за время  $t$ ,  $A(t)$  – электрическая энергия, потребленная за время  $t$ ,  $K_{\text{ЭН}}$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, количество оборотов диска счетчика пропорционально энергии. Вращение диска через червячное зацепление передается на счетчик числа оборотов, которое индицируется на цифровом индикаторе.

Бытовые и промышленные счетчики предназначены для измерения количества электрической энергии, выделяемой переменным током частотой 50 Гц.

Метрологические свойства счетчиков электрической энергии:

бытовые счетчики предназначены для измерения электрической энергии при напряжении 220 В и токе силой 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 А предел допускаемой основной относительной погрешности (то есть приведенной к текущему показанию) 2.5%;

промышленные счетчики предназначены для измерения перетоков большой электрической энергии при напряжении свыше 3000 В и токах до 1000 А, предел допускаемой основной относительной погрешности (то есть приведенной к текущему показанию) – от 0.5 %.

Нормированием и международной унификацией свойств счетчиков электрической энергии занимается специальный комитет Международной электротехнической комиссии (МЭК), поскольку результаты измерений перетоков электрической энергии через государственные границы являются основой для соответствующих расчетов и экономических санкций.

Схема включения счетчика электрической энергии точно такая же, как схема включения ваттметра (сравните рис. 28 в и рис. 32). Как и у ваттметра, генераторные зажимы счетчика обозначены звездочкой. После присоединения счетчика к электрической цепи корпус счетчика и все соединительные зажимы пломбируются во избежание экономических злоупотреблений.

В настоящее время начался выпуск доступных двухтарифных электронных счетчиков электрической энергии. Переключение тарифов выполняется сигналами по проводам электрической сети.

## **5.8. Средства расширения пределов измерения и правила выбора подходящего предела**

### **5.8.1. Типичные способы и средства расширения пределов измерения**

Расширение пределов измерения приборов – это важная технико-экономическая задача, целью которой является уменьшение объема при-

борного парка предприятия без ущерба для метрологического обеспечения испытаний изделий и управления технологическими процессами. При наличии средств расширения пределов измерения оказывается возможным применять один и тот же обычно дорогостоящий прибор для измерения величин различного размера. В конкретных ситуациях может потребоваться изменить предел измерения в сторону увеличения верхнего предела измерений, то есть уменьшить чувствительность прибора, а в других случаях наоборот, – повысить чувствительность, то есть изменить предел измерения в сторону уменьшения верхнего предела измерения. Возможны два варианта решения этой задачи.

В первом варианте средства расширения пределов измерения встраиваются в измерительный прибор, который снабжается ручным переключателем пределов. Такой прибор многопредельный, и его метрологические характеристики на разных пределах измерения могут различаться. Тогда они нормируются для каждого предела измерения по отдельности. Об этом потребителю сообщается надписями на шкале или в сопроводительной документации.

Во втором варианте используются внешние средства расширения пределов измерений. Этот вариант используется в тех случаях, когда измерения на одном выбранном пределе выполняются в течение длительного времени, например в системах управления технологическим процессом.

Такое внешнее средство расширения пределов измерения есть не что иное, как *масштабирующий линейный измерительный преобразователь*, который изменяет не вид измеряемой величины, а лишь ее масштаб. Эти преобразователи выпускаются промышленностью как автономные средства измерений. Каждая группа таких преобразователей имеет унифицированные свойства, присоединительные размеры и метрологические характеристики. Поэтому при их соединении с однопредельным измерительным прибором фактически получается новый прибор, метрологические характеристики которого должны быть рассчитаны по метрологическим характеристикам соединенных компонентов.

В качестве внешних средств расширения пределов измерения используются:

шунты для расширения пределов измерения силы тока в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности (применяются на постоянном и переменном токе);

делители напряжения и добавочные резисторы для расширения пределов измерения напряжения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности (применяются на постоянном и переменном напряжении);

усилители тока и напряжения для расширения пределов измерения тока или напряжения в сторону уменьшения максимального значения измеряемой величины, то есть для увеличения чувствительности (применяются на постоянном и переменном токе и напряжении);

измерительные трансформаторы тока и напряжения (могут применяться для расширения пределов измерения тока или напряжения в обе стороны, но чаще всего применяются для расширения пределов измерения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности).

Для внешних средств расширения пределов измерения могут нормироваться следующие метрологические характеристики:

диапазон изменения входного сигнала измерительной информации;

коэффициент преобразования (представляется своим номинальным значением);

входное сопротивление, или импеданс, с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него;

выходное сопротивление, или импеданс, с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него;

пределы основной относительной или приведенной погрешности

пределы допускаемой дополнительной погрешности (по каждой влияющей величине отдельно);

одна из полных динамических характеристик, соответствующих назначению преобразователя (в обоснованных случаях допускается нормировать частные динамические характеристики с указанием номинальных значений и пределов допускаемых отклонений от них).

В соответствии с ГОСТ 8.009 случайная составляющая считается существенной и подлежит специальному нормированию, если ее среднеквадратическое значение составляет не менее 10 % от общей погрешности.

### 5.8.2. Шунты

Схема соединения однопредельного амперметра с шунтом показана на рис. 33. Шунт имеет четыре зажима. Пара зажимов  $\Pi_1, \Pi_2$  называются *токовыми зажимами*, к ним подключается линия с измеряемым током. Два других зажима  $\Lambda_1, \Lambda_2$  – *потенциальные*, к ним подключается амперметр,

собственное сопротивление которого обозначено  $R_A$ . Потенциальные зажимы жестко соединены между определенными точками шунта путем сварки или другими методами, обеспечивающими высокую стабильность расположения этих точек и пренебрежимо малое и стабильное переходное сопротивление от этих точек к потенциальным зажимам.

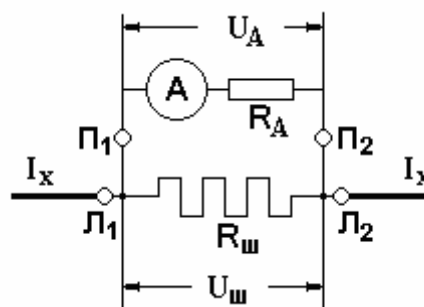


Рис. 33. Соединение амперметра с шунтом

Непосредственное присоединение амперметра к токовым зажимам недопустимо, поскольку нестабильность сопротивления контактов в токовых зажимах из-за различных усилий при винтовом соединении, из-за попадания грязи и пыли при большой силе тока будет вызывать соответствующую нестабильность падения напряжения на таких контактах и вызванную этим погрешность измерения, которая в данных условиях не может быть гарантирована изготовителями амперметра и шунта и не может быть определена при измерении.

Сопротивление шунта между точками присоединения потенциальных зажимов обозначено  $R_{ш}$ .

Пусть  $I_A$  – ток полного отклонения стрелки, соответствующий верхнему пределу диапазона измерения амперметра  $A$ , а  $U_A$  – падение напряжения на сопротивлении амперметра при этом токе:  $U_A = I_A R_A$ .

Пусть  $I_{\max}$  – верхний предел диапазона измерения силы тока, который желательно обеспечить с помощью шунта.

Очевидно, что при этой силе тока должно выполняться равенство  $I_A R_A = (I_{\max} - I_A) R_{\text{ш}}$ , откуда получаем значение масштабного коэффициента расширения предела измерения силы тока:

$$K = \frac{I_{\max}}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{\text{ш}}},$$

где  $K > 1$ .

В нормативной и сопроводительной документации на шунты указываются следующие метрологические характеристики шунтов:

номинальное падение напряжение на шунте при максимальном значении силы тока в диапазоне измерения из следующего стандартного ряда: 10, 45, 75 мВ;

верхний предел диапазона измерений, который обеспечивает данный шунт;

верхний предел измерения силы тока амперметром, с которым может быть использован данный шунт;

предел допускаемой основной **относительной** погрешности преобразования (основным источником погрешности является погрешность воспроизведения масштабного коэффициента  $K$ , которая порождает мультипликативную составляющую инструментальной погрешности, см. раздел 3.1.3),

пределы допускаемой дополнительной погрешности.

В документации на шунты, предназначенные для работы на переменном токе, указывается частотный диапазон, в котором их основная погрешность не превышает нормированный предел.

Для обеспечения совместимости шунта с амперметром в документации на амперметр и, как правило, на его шкале указывается падение напряжения на внутреннем сопротивлении амперметра при токе полного отклонения стрелки из ряда 10, 45, 75 мВ.

### 5.8.3. Добавочные резисторы

Для расширения пределов измерения напряжения могут использоваться делители напряжения и добавочные резисторы. Однако из-за того, что делитель напряжения должен потреблять от объекта ток, превышающий ток собственного потребления вольтметра, на практике для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные резисторы. Исключение составляет только электростатический вольтметр, который практически не потребляет ток, и с ним могут использоваться делители напряжения, составленные из активных сопротивлений или конденсаторов.

Добавочный резистор соединяется последовательно с вольтметром. Если собственное сопротивление вольтметра  $R_B$ , а значение сопротивления добавочного резистора  $R_D$ , то при подключении к вольтметру добавочного резистора верхний предел измерения увеличивается до напряжения

$$U_{\max} = I_{\text{Вmax}} (R_B + R_D),$$

где  $I_{\text{Вmax}}$  – ток полного отклонения стрелки вольтметра.

Поэтому коэффициент расширения предела измерения равен:

$$K = \frac{I_{\text{Вmax}} (R_B + R_D)}{I_{\text{Вmax}} R_B} = 1 + \frac{R_D}{R_B},$$

где  $K > 1$ .

Для обеспечения совместимости добавочного резистора и вольтметра, к которому он подключается, в документации на вольтметр и, как правило, на его шкале указывается ток полного отклонения стрелки. Подходящее сопротивление добавочного резистора подбирается по следующим признакам:

коэффициент расширения предела измерения  $R_D = R_B (K - 1)$ ;

максимально допустимый ток через  $R_D$ , который не должен быть больше, чем  $I_{\text{Вmax}}$ , и сопротивление  $R_D$  не должно перегреваться этим током;

характеристики инструментальной погрешности, которая складывается из собственной погрешности вольтметра и погрешности добавочного резистора, в том числе возникающей в результате перегрева протекающим по нему током.

С учетом изложенного в документации на добавочное сопротивление приводятся следующие метрологические характеристики:

номинальное значение сопротивления;

предел допускаемой основной **относительной** погрешности (поскольку, согласно разделу 5.8.2, аддитивная составляющая пренебрежимо мала по сравнению с мультипликативной);

максимально допустимое значение силы тока;

предел допускаемой дополнительной погрешности.

#### 5.8.4. Измерительные трансформаторы тока

Применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного тока. Измерительные трансформаторы тока имеют существенное преимущество перед шунтами, которое заключается в том, что при их применении отсутствует гальваническая связь между первичной обмоткой, включенной в мощную электрическую цепь объекта, и вторичной обмоткой. Разрыв этой связи способствует обеспечению безопасности персонала, снижению действия помех и облегчает выполнение необходимых соединений во вторичной цепи. Кроме того в ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и мало зависит от внешних влияющих факторов. Схема включения измерительного трансформатора тока в линию с измеряемым током  $\dot{I}_x$  и

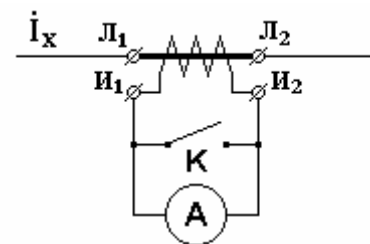


Рис. 34. К применению трансформатора тока

присоединения амперметра ко вторичной обмотке представлена на рис. 34. Здесь  $L_1, L_2$  – зажимы первичной обмотки трансформатора, к которым подключена линия,  $И_1, И_2$  – зажимы вторичной обмотки, к которым подключается амперметр,  $K$  – ключ, замыкающий вторичную обмотку.

Опасным режимом для трансформатора тока является режим холостого хода, при котором на вторичной обмотке развивается высокое напряжение и возможен пробой изоляции. Напротив, благоприятный режим для трансформатора тока – режим короткого замыкания вторичной обмотки. В



связи с этим чрезвычайно важно выполнять следующие **правила включения трансформатора тока с амперметром в линию.**

Перед включением первичной обмотки в линию вторичная обмотка обязательно должна быть замкнутой накоротко ключем К или на амперметр (см. рис. 34). Если обмотка замкнута ключем, то его можно разомкнуть только в том случае, когда включен амперметр и проверена целостность его цепи и качество контактов в местах присоединений.

Как отмечено ранее, коэффициент преобразования трансформатора тока в ограниченном диапазоне частот равен отношению числа витков обмоток трансформатора и может быть как больше, так и меньше единицы.

Особенностью измерительного трансформатора тока является также то, что в отличие от других трансформаторов тока он имеет нормированные метрологические характеристики:

- пределы изменения силы тока первичной обмотки, подлежащего измерению;

- предел измерения амперметра, включаемого во вторичную обмотку;

- предел допускаемой основной относительной погрешности по амплитуде;

- предел допускаемой основной погрешности по фазе;

- предельные значения сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, при которых инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности;

- пределы допускаемых дополнительных погрешностей;

- частотный диапазон, в котором инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности.

### **5.8.5. Измерительные трансформаторы напряжения**

Измерительные трансформаторы напряжения применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного напряжения. Применение измерительных трансформаторов напряжения дает те же преимущества перед применением добавочных сопротивлений, что и применение трансформаторов тока (см. раздел 5.8.4). В ограниченном частотном

диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и практически не зависит от действия внешних влияющих факторов. С увеличением частоты сверх этого диапазона начинают расти погрешности передачи амплитуды и фазы измеряемого напряжения. Схемы соединений трансформатора напряжения с участком электрической цепи и с вольтметром во вторичной обмотке различий не имеют.

Измерительный трансформатор напряжения отличается от других трансформаторов напряжения тем, что он имеет следующие нормированные метрологические характеристики:

пределы изменения напряжения, действующего на первичной обмотке;

предел измерения вольтметра, включаемого во вторичную обмотку;

предел допускаемой основной относительной погрешности по амплитуде;

предел допускаемой основной погрешности по фазе;

предельные значения сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, при которых инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности;

пределы допускаемых дополнительных погрешностей;

частотный диапазон, в котором инструментальные погрешности трансформатора не превышают норм, установленных на основные погрешности.

### 5.8.6. Правило выбора предела измерения

При выборе пределов измерения аналоговых приборов необходимо иметь в виду, что нормой, установленной на их инструментальную погрешность, как на приведенную к максимальному значению в диапазоне измерения, потребителю даются гарантии только в том, что вне зависимости от истинного значения измеряемой величины в любой точке шкалы

$$|A_{\text{инст}}| \leq \frac{\gamma_{\text{СИ}} |x|_{\text{max}}}{100},$$

где  $\gamma_{СИ}$  – гарантированное значение основной приведенной погрешности прибора, допущенного к применению и это же – численное обозначение класса точности прибора.

Это означает, что если истинное значение измеряемой величины составляет половину максимального, то есть показание прибора оказывается в середине шкалы, то об относительной погрешности  $\gamma_{рез}$  результата такого измерения потребитель не может предполагать ничего, кроме следующего:

$$|\gamma_{рез}| = \frac{|\Delta_{инст}|}{|x|} 100\% \leq \frac{\gamma_{СИ} |x|_{max}}{|x|_{max} / 2} = 2\gamma_{СИ}.$$

Если истинное значение измеряемой величины составляет треть верхнего предела измерений, то относительная погрешность результата оказывается втрое больше, чем объявленный класс точности. Вообще, чем ближе к началу шкалы прибора, тем больше относительная погрешность результата измерения.

В связи с этим следует руководствоваться таким *правилом выбора предела измерений*.

**Предел измерений аналогового измерительного прибора следует выбирать таким образом, чтобы показания прибора находились в последней трети его шкалы.** При таком выборе возрастание относительной погрешности результатов измерений по отношению к объявленному классу точности прибора не будет превышать 1,5.

### **5.9. Применение аналоговых электромеханических электроизмерительных приборов для измерений в трехфазных цепях переменного тока**

Будут рассмотрены особенности измерений в трехфазных цепях переменного тока следующих величин: действующие значения тока и напряжения, активная и реактивная мощность и энергия. Тривиальные методы измерений указанных величин тремя отдельными приборами в каждой фазе или в каждой линии изучать не будем в силу их очевидности.

### 5.9.1. Измерение линейных токов и напряжений в трехфазной трехпроводной цепи

Рассмотрим подход, позволяющий в отличие от очевидного случая использования вместо трех трансформаторов тока или напряжения соответственно применять только два трансформатора при любой схеме включения нагрузки (звезда или треугольник). Схемы включения трансформаторов и приборов представлены на рис.35.

Такая экономия измерительных трансформаторов оказалась возможной благодаря тому, что в трехфазных трехпроводных цепях сумма линейных токов и сумма линейных напряжений равны нулю. Отсюда следует, что

$$I_3 = -(I_1 + I_2), \quad \dot{U}_{CA} = -\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}.$$

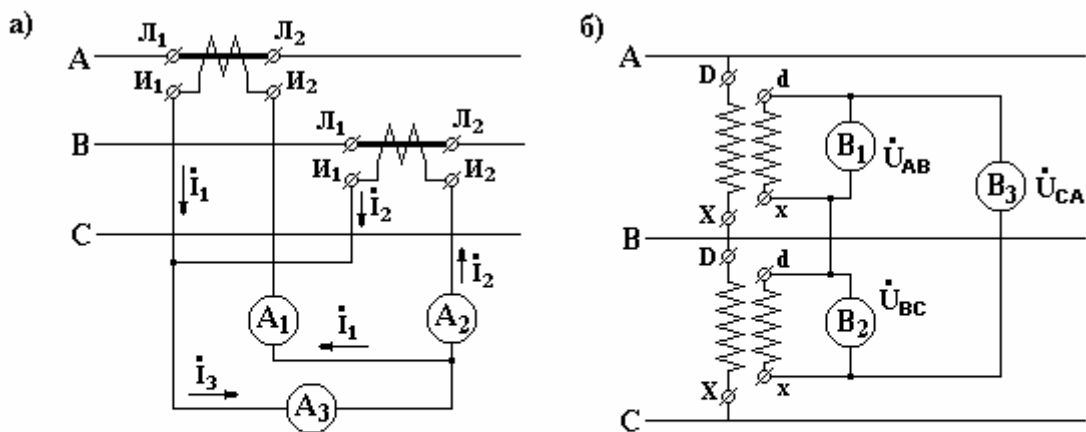


Рис. 35. Измерения линейных токов и напряжений в трехфазных трехпроводных цепях

Поскольку амперметры  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и вольтметры  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  суть приборы, предназначенные для измерения действующих значений токов и напряжений соответственно, инвертирования фазы они не чувствуют.

### 5.9.2. Измерение активной электрической мощности и энергии в симметричных трехфазных цепях одним прибором

Поскольку схемы включения ваттметра и счетчика электрической энергии одинаковы (сравните рис. 28 и рис. 32), под понятием “прибор” мы будем подразумевать оба указанных средства измерений.

Если схема включения нагрузки – звезда с доступной нейтралью, то прибор включается в соответствии с рис. 36 а), и общая активная мощность и энергия, потребляемая нагрузкой получается умножением показаний прибора на три.

При недоступной нейтрали в симметричной трехфазной цепи, когда, например, нагрузка включена по схеме треугольника (рис. 36, б), делают искусственную нейтраль. Для этого между фазами *B* и *C* включают последовательно два резистора, сопротивление каждого из которых равно сопротивлению параллельной цепи прибора (ваттметра или счетчика энергии). Точку их соединения подключают к негенераторному зажиму параллельной цепи прибора. В результате эта точка становится нейтралью, если, конечно, нагрузка симметрична.

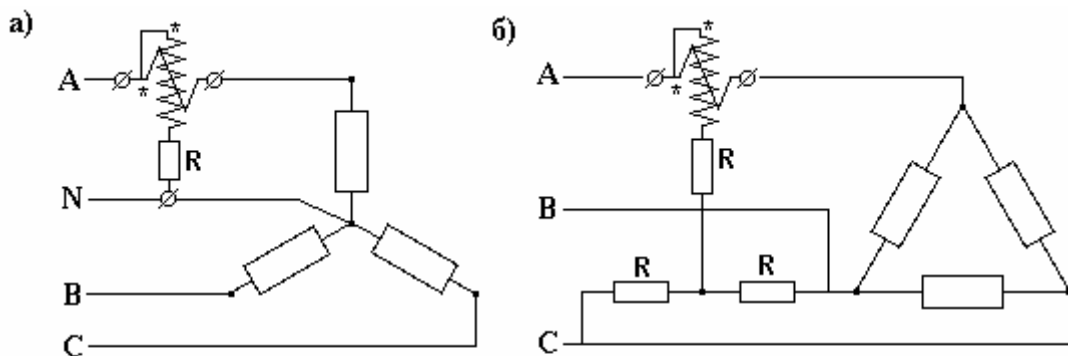


Рис. 36. Включение ваттметра и счетчика электрической энергии для измерений в симметричных трехфазных цепях с доступной и недоступной нейтралью

Общую мощность и энергию, потребляемую в трехфазной цепи, подсчитывают, умножая на 3 показания соответствующих приборов.

### 5.9.3. Измерение реактивной электрической мощности и энергии в симметричных трехфазных цепях одним прибором

Кроме активной мощности и энергии, расходуемой потребителями, очень важно контролировать реактивные компоненты мощности и энергии, на выработку которых затрачиваются дефицитные энергоресурсы, не используемые в силу их преобразования в бесполезное для практической реализации электромагнитное излучение. При превышении норм, установленных на допускаемую долю этих реактивных компонент, к потребителям предъявляются штрафные санкции.

Реактивная мощность  $P_{PE} = U_D I_D \sin \varphi = U_D I_D \cos(90^\circ - \varphi)$ . Отсюда следует, что для измерения реактивной мощности в однофазной цепи или в каждой фазе трехфазной цепи по отдельности необходимо сдвинуть фазу в одной из цепей ваттметра или счетчика энергии на  $90^\circ$ . Практически это можно сделать только в параллельной цепи данных приборов.

Если трехфазная цепь симметрична, нагрузка включена по схеме звезда, то в этом случае (см. векторную диаграмму рис. 37):

линейные токи одинаковы по модулю и равны токам в фазах;

векторы линейных напряжений ортогональны векторам противоположных фазовых напряжений, например, вектор  $\dot{U}_{BC}$  ортогонален вектору  $\dot{U}_A$ ;

линейные напряжения одинаковы по модулю, их модули больше модулей фазовых напряжений в  $\sqrt{3}$ , то есть

$$|\dot{U}_{BC}| = |\dot{U}_A| \sqrt{3};$$

общая потребляемая мощность и электрическая энергия равны утроенной фазовой мощности и, соответственно, утроенной фазовой энергии.

Поэтому при включении ваттметра по схеме а) рис. 38 вращающий момент, действующий на его подвижную часть, пропорционален величине  $(\dot{U}_{BC})_D (\dot{I}_A)_D \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между векторами  $\dot{I}_A$  и  $\dot{U}_{BC}$ ,  $(\dot{U}_{BC})_D$  – дей-

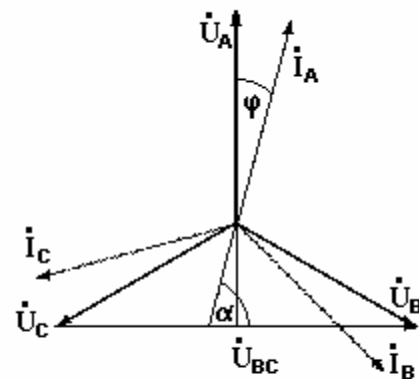


Рис. 37. К измерению реактивной мощности и энергии.

ствующее значение линейного напряжения  $\dot{U}_{BC}$ ,  $(\dot{I}_A)_D$  - действующее значение линейного, в этом случае также и фазного тока  $\dot{I}_A$ .

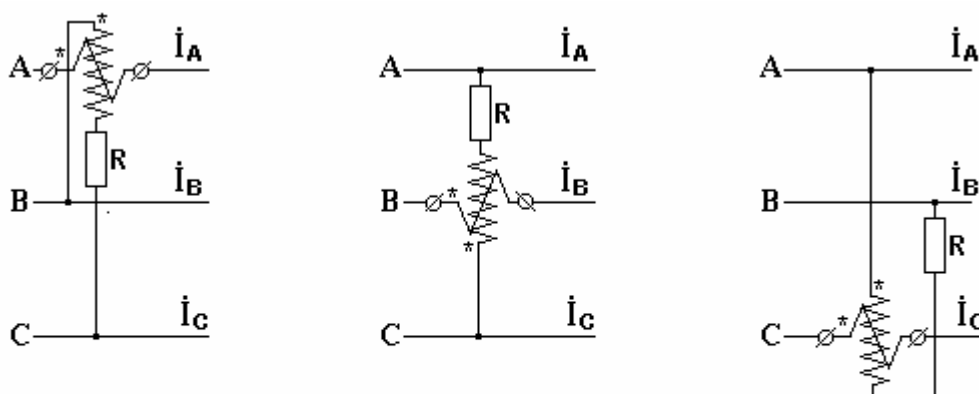


Рис. 38. Схемы включения одного прибора для измерения реактивной электрической мощности и энергии в симметричной трехфазной цепи

Поскольку  $|\dot{U}_{BC}| = \sqrt{3}|\dot{U}_A|$  и  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ , то полная реактивная мощность трехфазной цепи будет равна

$$P_{PE} = 3(\dot{U}_A)_D (\dot{I}_A)_D \sin \varphi = \sqrt{3}(\dot{U}_{BC})_D (\dot{I}_A)_D \cos \alpha.$$

Аналогичные выводы справедливы и для других вариантов схем включения ваттметра (рис. 38, б, в).

Это означает, что для получения результата измерения реактивной мощности, которая рассеивается симметричной трехфазной цепью, достаточно умножить на  $\sqrt{3}$  показание ваттметра, включенного по любому варианту из показанных на рис. 38.

Такие же выводы и рекомендации относятся к схемам включения счетчиков электрической энергии и к получению результата измерения реактивной электрической энергии, рассеиваемой симметричной трехфазной цепью.

#### 5.9.4. Измерение активной электрической мощности и энергии в трехфазных цепях с помощью двух приборов

Для того, чтобы измерить полную активную мощность или электрическую энергию, потребляемую трехфазной цепью, с помощью только двух

приборов, необходимо использовать следующие соотношения между линейными токами и напряжениями.

Пусть  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  – линейные токи в фазах  $A, B, C$  соответственно, и  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  – линейные напряжения между соответствующими фазами.

Известно, что  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$  и  $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$ . Мощность, выделяемая, например, в фазе  $A$ , равна скалярному произведению векторов  $P_A = \dot{U}_A \dot{I}_A$ .

Точно так же в других фазах  $P_B = \dot{U}_B \dot{I}_B$  и  $P_C = \dot{U}_C \dot{I}_C$ . Суммарная мощность, потребляемая нагрузкой, равна  $P = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B + \dot{U}_C \dot{I}_C$ . Но  $\dot{I}_C = -\dot{I}_A - \dot{I}_B$ . Поэтому

$$P = \dot{U}_A \dot{I}_A + \dot{U}_B \dot{I}_B - \dot{U}_C \dot{I}_A - \dot{U}_C \dot{I}_B = \dot{I}_A (\dot{U}_A - \dot{U}_C) + \dot{I}_B (\dot{U}_B - \dot{U}_C).$$

Разности напряжений  $\dot{U}_A - \dot{U}_C$  и  $\dot{U}_B - \dot{U}_C$  суть линейные напряжения  $\dot{U}_{AC}$  и  $\dot{U}_{BC}$  соответственно. В результате получаем формулу

$$P = \dot{I}_A \dot{U}_{AC} + \dot{I}_B \dot{U}_{BC}, \quad (31)$$

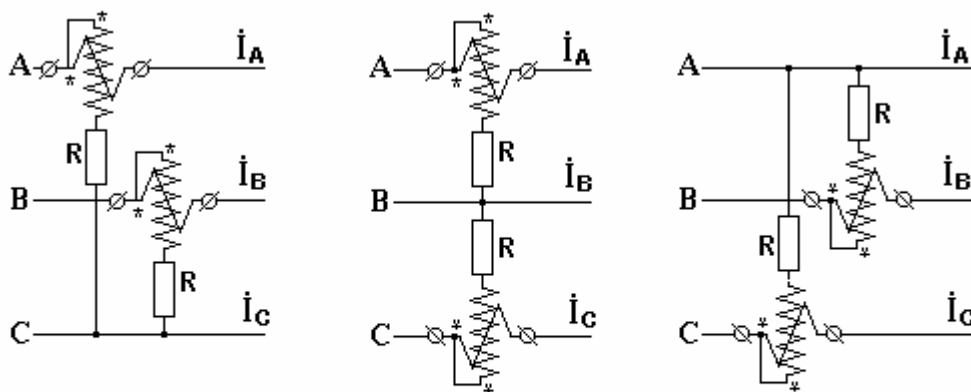


Рис. 39. Варианты включения двух ваттметров и (или) счетчиков активной мощности и электрической энергии в трехфазных цепях

которой соответствует первый вариант схемы рис. 39, а) присоединения двух приборов к линиям трехфазной цепи в целях измерения полной активной электрической мощности или энергии, потребляемой нагрузкой. Эта мощность или энергия вычисляется, как сумма показаний двух приборов.



Аналогично доказывается правомерность других вариантов схем рис. 39, б, в.

Рассмотренные схемы реализуются в трехфазных счетчиках электрической энергии, в корпусе которых размещены два механизма (см. рис. 39). Оба диска расположены на одной оси, благодаря чему вращающие моменты, создаваемые каждой парой электромагнитов, суммируются в соответствии с формулой (31).

## **6. МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Мостовые методы измерения и преобразования параметров элементов электрических цепей (сопротивления, индуктивности и емкости) широко применяются как для измерения этих параметров, так и для создания на их основе измерительных преобразователей измерительных информационных систем (ИИС).

Будут рассмотрены мосты постоянного и переменного тока, работающие в равновесном и неравновесном режимах.

### **6.1. Мосты постоянного тока**

#### **6.1.1. Мосты постоянного тока в равновесном режиме**

Мосты постоянного тока, работающие в равновесном режиме (далее – *равновесные мосты*), относятся к средствам измерения сравнения и предназначены для измерения сопротивления. Схема равновесного моста постоянного тока представлена на рис. 40, а. Этот мост называется *одинарным мостом* и предназначен для измерения сопротивлений от единиц Ом до  $10^{14}$  Ом. Для измерения малых сопротивлений от  $10^{-4}$  до 50 Ом применяется *двойной мост* (см. рис. 40, б).

Рассмотрим вначале свойства одинарного моста.

Измеряемое сопротивление  $R_x$  включается в одно из плеч моста, и процесс измерения заключается в том, что изменением сопротивления, находящегося в другом плече, например сопротивления  $R_1$ , добиваются равновесия моста, то есть такого состояния, при котором в диагонали моста  $BC$  ток не идет. Для индикации этого состояния в диагональ  $BC$ , называемую *измерительной диагональю*, включается высокочувствительный микроамперметр, выполняющий функцию нуль-индикатора (НИ). Ключ  $K$  предназначен для кратковременного включения нуль-индикатора в диагональ, поскольку при значительном отличии от равновесия длительное включение НИ может привести к выходу его из строя.

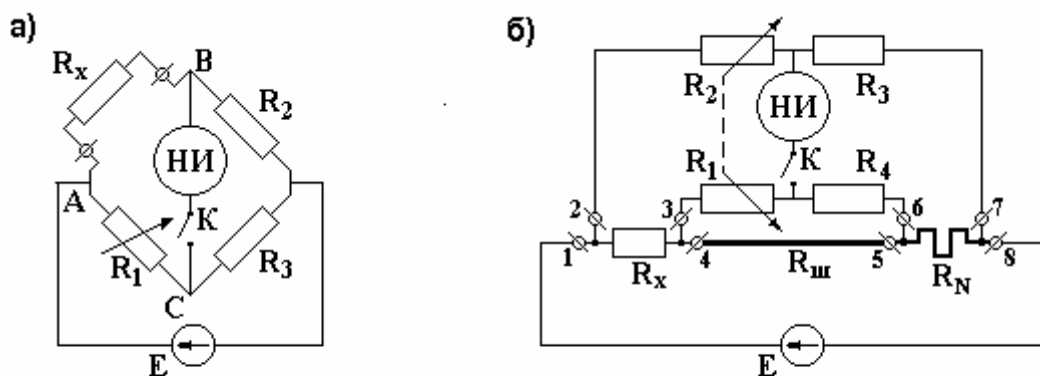


Рис. 40. Одинарный а) и двойной б) мосты постоянного тока

Равновесие моста наступит в том случае, когда падения напряжений на плечах  $AB$  и  $AC$  сравняются, то есть когда

$$E \frac{R_x}{R_2 + R_x} = E \frac{R_1}{R_1 + R_3}, \quad (32)$$

где  $E$  – напряжение питания моста.

Из равенства (32) следует

$$R_x (R_1 + R_3) = R_1 (R_2 + R_x).$$

Отсюда получаем условие отсутствия тока в измерительной диагонали, то есть условие равновесия моста

$$R_x R_3 = R_1 R_2. \quad (33)$$

Значения сопротивлений  $R_1, R_2, R_3$  известны, поэтому значение измеряемого сопротивления вычисляется по формуле

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}. \quad (34)$$

Обычно в серийных мостах с ручным уравниванием сопротивления  $R_2, R_3$  подбираются так, чтобы отношение  $R_2 / R_3 = 10^k$ , где  $k$  – целое число, положительное, отрицательное или 0. Тем самым обеспечивается удобство отсчитывания значения измеряемого сопротивления в десятичном коде по шкале значений регулируемого сопротивления  $R_1$ . В мостах, которые уравниваются под управлением компьютера, обеспечивается отношение  $R_2 / R_3 = 2^k$ .

Как следует из (33), (34), условия равновесия не зависят от напряжения питания моста. Но это не значит, что напряжение питания может быть сколь угодно малым, так как при уменьшении напряжения питания снижается чувствительность моста и возрастает неопределенность в фиксации состояния равновесия, что, в свою очередь, приводит к росту аддитивной погрешности результата измерений. Поэтому в целях увеличения чувствительности моста следует повышать напряжение питания. Однако при этом возрастают токи, сопротивления нагреваются этими токами и их значения меняются, в результате чего возрастает погрешность измерений. Поэтому повышать напряжение питания можно только до уровня, при котором перегрев сопротивлений плеч не приводит к увеличению погрешности, вызванной таким перегревом. Кроме того, чувствительность моста зависит от соотношения сопротивлений плеч. Максимальной чувствительностью обладает равноплечий мост, то есть мост, у которого значения сопротивлений плеч одинаковы.

Существенные трудности возникают при измерениях малых сопротивлений, значения которых составляют единицы и доли ом. Подобными сопротивлениями обладают мощные электрические двигатели и генераторы, трансформаторы и другие агрегаты.

Эти трудности вызваны следующими причинами:

если измеряемое сопротивление составляет десятые и сотые доли ом, то для того, чтобы падение напряжения на плече  $AB$  моста достигло единиц вольт, необходимо пропустить через него ток несколько десятков и сотен ампер соответственно, сопротивление  $R_2$  также должно быть низким, ибо в противном случае на нем будет выделяться недопустимо высокая мощность;

для обеспечения приемлемой чувствительности моста необходимо, чтобы сопротивления  $R_1, R_3$  имели значения одного порядка с значениями сопротивления  $R_x$ ;

погрешность регулировки и отсчитывания значений сопротивления  $R_1$ , равного десятым и сотым долям ом, недопустимо велика из-за влияния нестабильного сопротивления контактов и соединительных проводов, значения которых могут даже превышать значение измеряемого сопротивления.

Поэтому для указанной цели одинарный мост непригоден, и для измерения малых сопротивлений применяется двойной мост, схема которого представлена на рис. 40 б).

Большой ток, необходимый для создания значительного напряжения на измеряемом сопротивлении, пропускается по цепи '1, 4, 5, 8'. В этой цепи включено образцовое высокоточное сопротивление  $R_N$ , значение которого сопоставимо со значением измеряемого сопротивления, и в данную цепь последовательно включается измеряемое сопротивление  $R_x$ . Указанные сопротивления соединены толстой медной шиной с ничтожно малым сопротивлением. Контакты 1, 4, 5, 8 – токовые контакты сопротивлений, контакты 2, 3, 6, 7 – потенциальные контакты (зажимы). О цели разделения контактов на токовые и потенциальные см. раздел 5.8.2.

При равновесии моста

$$R_x = R_N \frac{R_2}{R_3} - \frac{R_{\text{ш}} R_4}{R_{\text{ш}} + R_1 + R_4} \left( \frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3} \right).$$

Источники погрешностей измерений, выполняемых равновесными мостами:

ограниченная чувствительность нуль-индикатора, порождает аддитивную погрешность измерений;

погрешности в изготовлении резисторов моста, в том числе погрешность регулируемого резистора, и нестабильность контактов переключателей регулируемого резистора вызывают мультипликативную погрешность измерений.

Метрологические характеристики равновесных мостов приведены в разд. 6.3. Основная погрешность равновесных мостов нормируется как относительная погрешность.

### 6.1.2. Мосты постоянного тока в неравновесном режиме

Мосты постоянного тока, работающие в неравновесном режиме, применяются как измерительные преобразователи сопротивления (или приращения сопротивления) в постоянный ток или в напряжение.

Принцип действия и назначение неравновесных мостов рассмотрим на двух примерах мостов, сопротивления плеч которых при равновесии одинаковы. (см. рис. 41). Будем также считать, что в измерительную диагональ включено высокое сопротивление нагрузки (например, сопротивление вольтметра или входное сопротивление усилителя), существенно превышающее сопротивления плеч моста:  $R_{\text{н}} \gg R$ .

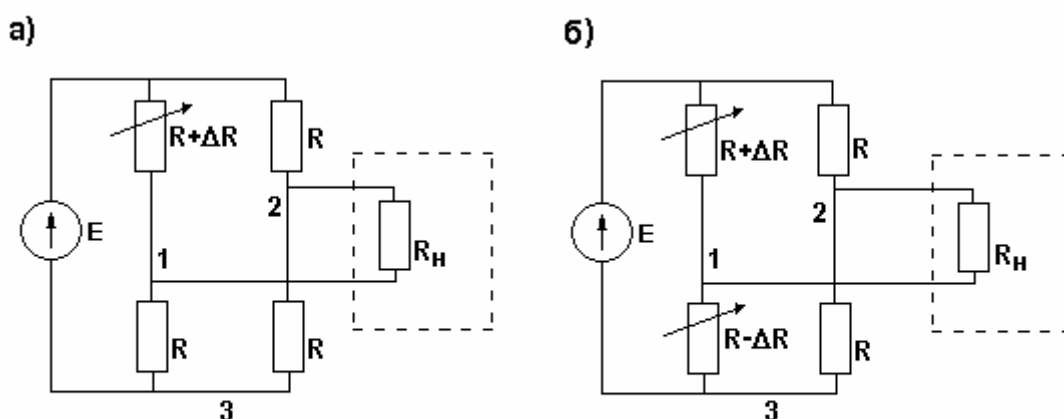


Рис. 41. Мосты постоянного тока в неравновесном режиме

В первом варианте (рис. 41 а) в одно из плеч моста включено сопротивление, приращение которого  $\Delta R$  необходимо преобразовать в соответствующее изменение напряжения. При  $\Delta R = 0$  мост уравновешен и напряжение  $U_{21}$  в его измерительной диагонали между точками 2 и 1 также равно нулю. При изменении этого сопротивления напряжение в измерительной диагонали будет изменяться в соответствии с функцией преобразования

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23} - U_{13}(\Delta R) = \frac{E}{2} - \frac{ER}{R + R + \Delta R} = E \frac{\Delta R}{4R \left(1 + \frac{\Delta R}{2R}\right)}.$$

Обозначим относительное приращение сопротивления через  $\varepsilon$ , тогда

$$U_{21}(\varepsilon) = E \frac{\varepsilon}{4 \left(1 + \frac{\varepsilon}{2}\right)}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \quad (35)$$

В ряде случаев может представиться вариант дифференциального включения изменяющихся сопротивлений в разные плечи моста (см. рис. 41 б). При таком включении чувствительность моста удваивается и функция преобразования имеет вид

$$U_{21}(\Delta R) = U_{23}(\Delta R) - U_{13}(\Delta R) = \frac{ER}{2R} - \frac{E(R - \Delta R)}{2R} = E \frac{\Delta R}{2R}.$$

В этом случае функция преобразования относительного приращения сопротивления в напряжение линейна:

$$U_{21}(\varepsilon) = \frac{E}{2} \varepsilon. \quad (36)$$

Из выражений для функций преобразования (35) и (36) следует, что: неравновесный мост может применяться в качестве измерительного преобразователя приращения сопротивления в напряжение; в общем случае функция преобразования нелинейна; погрешность преобразования порождается нестабильностью напряжения питания моста, а также погрешностью изготовления и нестабильностью сопротивлений плеч.

Метрологические характеристики неравновесных мостов приведены в разделе 6.3. Для тензорезистивных мостов, функция преобразования которых линейна, нормируется относительная погрешность двучленной формулой. Если нелинейность неравновесного моста проявляется значительно, то для него нормируется основная приведенная погрешность.

## 6.2. Мосты переменного тока

### 6.2.1. Условия равновесия мостов переменного тока

Мосты переменного тока предназначены для измерения комплексных сопротивлений элементов электрических цепей. Поэтому напряжение питания таких мостов переменное, а плечи моста – комплексные сопротивления (рис. 42, а). На рис.42, б, в также представлены схемы мостов частного вида, предназначенных для измерения емкости конденсатора (рис. 42, б) и индуктивности катушки (рис. 42, в).

Условия равновесия мостов переменного тока выводятся так же, как условия равновесия мостов постоянного тока (см. раздел 6.1.1), и в итоге оно определяется с помощью равенства

$$Z_x Z_3 = Z_1 Z_2, \quad (37)$$

где  $Z_x$  – измеряемое комплексное сопротивление (импеданс),  $Z_1, Z_2, Z_3$  - комплексные сопротивления - плечи моста.

Применяя экспоненциальное представление комплексных чисел, перепишем условие (37) в виде

$$|Z_x|e^{j\varphi_x}|Z_3|e^{j\varphi_3} = |Z_1|e^{j\varphi_1}|Z_2|e^{j\varphi_2}.$$

По признаку равенства комплексных чисел, этому равенству соответствует система двух равенств

$$\begin{cases} |Z_x||Z_3| = |Z_1||Z_2| \\ \varphi_x + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2 \end{cases} \quad (38)$$

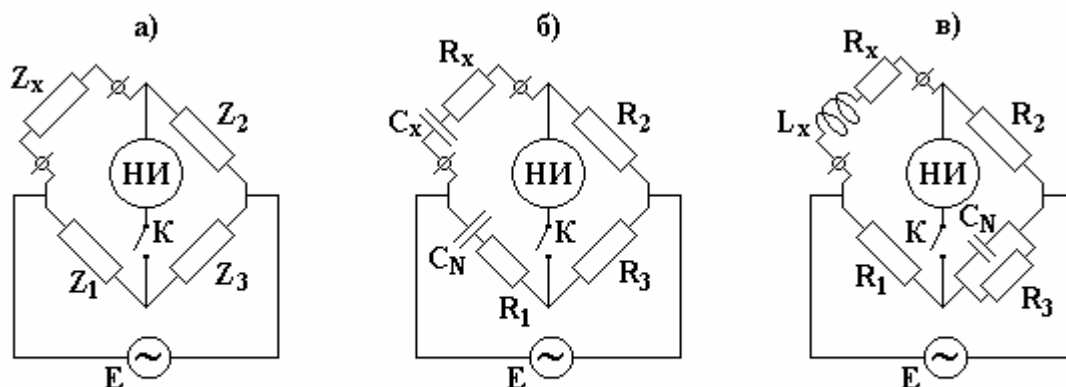


Рис. 42. Мосты переменного тока

Это означает, что уравновешивать мост переменного тока необходимо по двум компонентам: по модулю и фазе. Для контроля состояния равновесия моста необходимо применять фазочувствительный нуль-индикатор, который позволяет фиксировать не только изменения амплитуды тока в измерительной диагонали, но и инверсию фазы этого тока, происходящую при переходе через положение равновесия.

### 6.2.2. Мост переменного тока для измерения емкости конденсатора

При измерении емкости конденсатора необходимо иметь в виду, что любой конденсатор неидеален, его сопротивление переменному току комплексное из-за потерь активной мощности, возникающей в силу несовершенства изоляции, находящейся между пластинами. В связи с этим, а также в соответствии с общей процедурой подготовки и проведения измерений вначале необходимо сформировать математическую модель объекта измерений, в данном случае – конденсатора, как объекта, обладающего комплексным сопротивлением переменному току.



Такая математическая модель в электротехнике называется схемой замещения. В зависимости от размера потерь активной мощности на практике используется одна из двух схем замещения: для конденсаторов с малыми потерями (рис. 43, а), для конденсатора с большими потерями – (рис.43, б).

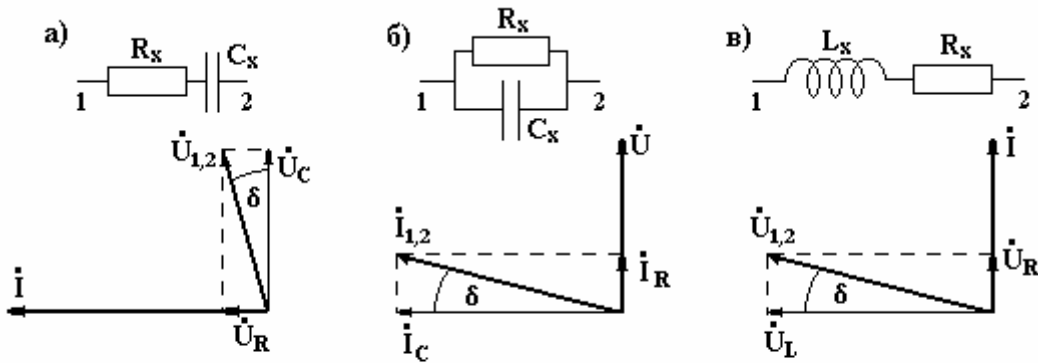


Рис. 43. Схемы замещения реального конденсатора и индуктивности

Сопротивление  $R_x$  в этих схемах называется *сопротивлением потерь*. В разных схемах замещения реального конденсатора сопротивление потерь и значение емкости будут различаться. В качестве показателя активных потерь конденсатора, не зависящего от схемы замещения, используется тангенс угла  $\delta$ . Этот угол есть отличие от  $90^\circ$  угла сдвига фазы между векторами тока и напряжения, вносимого реальным конденсатором.

Пример схемы моста, предназначенного для измерения параметров схемы замещения конденсатора с малыми потерями, представлен на рис. 42, б. В этой схеме в одно из плеч моста включен конденсатор  $C_N$ , емкость которого известна с высокой точностью. Погрешность, с которой известна емкость конденсатора  $C_N$ , и его потери пренебрежимо малы.

Для вывода условий равновесия моста используем формулу (37):

$$\left( R_x + \frac{I}{j\omega C_x} \right) R_3 = \left( R_1 + \frac{I}{j\omega C_N} \right) R_2,$$

откуда, по признаку равенства комплексных чисел, следует:

$$R_x R_3 = R_2 R_1, \quad \frac{R_3}{C_x} = \frac{R_2}{C_N},$$

и, наконец, при достижении равновесия результаты измерений вычисляются по формулам

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}, \quad C_x = C_N \frac{R_3}{R_2}.$$

Преимуществом такого моста является возможность его уравнивания по обеим составляющим с помощью активных сопротивлений. В качестве одного из регулируемых сопротивлений следует, бесспорно, выбрать  $R_1$ , а в качестве другого –  $R_2$  или  $R_3$ .

Источники погрешностей измерений с помощью равновесных мостов переменного тока приведены в разделе 6.2.3, а метрологические характеристики приведены в разделе 6.3.

### 6.2.3. Мост переменного тока для измерения индуктивности катушки

Математической моделью катушки как объекта, обладающего комплексным сопротивлением переменному электрическому току, является схема замещения, приведенная на рис. 43, в. Сопротивлением потерь здесь является активное сопротивление провода, которым намотана катушка.

Пример схемы моста для измерения параметров схемы замещения катушки индуктивности представлен на рис. 42, в.

Для вывода условий равновесия моста используем формулу (37):

$$(R_x + j\omega L_x) \left( \frac{R_3}{1 + j\omega R_3 C_N} \right) = R_1 R_2.$$

После приведения к общему знаменателю получим

$$R_3 (R_x + j\omega L_x) = R_1 R_2 (1 + j\omega R_3 C_N).$$

Откуда, по признаку равенства комплексных чисел, следует:

$$R_x R_3 = R_2 R_1, \quad \omega L_x = \omega R_1 R_2 C_N,$$

и, наконец, при достижении равновесия результаты измерений вычисляются по формулам

$$R_x = R_1 \frac{R_2}{R_3}, \quad L_x = R_1 R_2 C_N. \quad (37)$$

Привлекательным свойством такого моста является возможность его уравнивания по обеим составляющим с помощью активных сопро-

тивлений. В качестве одного из регулируемых сопротивлений следует, бесспорно, выбрать  $R_1$ , а в качестве другого –  $R_2$ .

Источники погрешностей измерений, выполняемых равновесными мостами переменного тока:

ограниченная чувствительность нуль-индикатора, порождает аддитивную погрешность измерений;

погрешности в изготовлении резисторов моста, в том числе погрешность регулируемого резистора, погрешность изготовления конденсатора  $C_N$ , отличие от нуля его сопротивления потерь, нестабильность контактов переключателей регулируемого резистора вызывают мультипликативную погрешность измерений.

Метрологические характеристики мостов приведены в разделе 6.3.

### 6.3. Метрологические характеристики мостов

Аддитивная составляющая погрешности мостов, работающих в равновесном режиме, вызвана действием только одного фактора, а именно, ограниченной чувствительностью нуль-органа. Влияние этого фактора на общую погрешность моста может быть сделано пренебрежимо малым по сравнению с погрешностью, порожденной неточностью изготовления резисторов и других комплектующих, то есть мультипликативной составляющей погрешности. Поэтому нормируемой характеристикой погрешности мостов является **предел допускаемой основной относительной погрешности**.

Метрологические характеристики равновесных мостов:

диапазон изменения измеряемой величины;

характеристика основной относительной погрешности;

характеристики дополнительных погрешностей;

напряжение питания моста.

Неравновесные мосты представляют собой, по сути дела, измерительные преобразователи. Их выходной сигнал и, следовательно, погрешность зависят не только от изменения измеряемой величины и от погрешности изготовления сопротивлений плеч моста, но и от напряжения питания. В силу нелинейности функции преобразования большинства мостов, рабо-

тающих в неравновесном режиме при больших изменениях измеряемого сопротивления, для них нормируется основная приведенная погрешность (см. разд. 3.1.1, 5.1). Исключение составляют неравновесные мосты, плечи которых образуют тензорезисторы (см. разд. 8.2). Относительное изменение сопротивления тензорезисторов невелико, и такие мосты могут считаться линейными с большой степенью точности.

Поэтому в тех случаях, когда мост используется в неравновесном режиме и когда

напряжение в диагонали моста линейно зависит от изменения параметров этого моста;

в состав подобного моста включен линейный усилитель сигнала измерительной диагонали;

и этот усилитель обладает собственной аддитивной и мультипликативной погрешностью;

тогда характеристика основной абсолютной погрешности нормируется двучленной формулой (см. разд. 3.1.3).

## **7. ЦИФРОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

### **7.1. Цифроаналоговые преобразователи**

Примером простейшего цифроаналогового преобразователя (ЦАП) десятичного кода в аналоговую величину может служить шестидекадный магазин сопротивлений с ручным управлением. Цена единицы младшей



ключи и усилитель. Однако ЦАП в таком составе не позволяет нормировать метрологические характеристики, и поэтому подобные микросхемы функции средства измерений выполнять не могут. ЦАП, который может считаться средством измерений, должен содержать помимо показанного на рис. 44, как минимум, следующие обязательные компоненты: источник опорного напряжения, стабилизирующего токи  $I_0$  и стабилизатор напряжения питания. Кроме того, в каждом ЦАП, предназначенном для совместной работы с компьютером (процессором) предусматривается устройство интерфейсного сопряжения с компьютером и устройство гальванического разделения по цифровому входу/выходу (рис. 45).



Рис. 45. Состав ЦАП, сопрягаемого с компьютером

Источники погрешности ЦАП: неточность изготовления сопротивлений, нестабильность питания, нестабильность опорного напряжения и, как следствие, нестабильность токов  $I_0$ . Кроме того, при переключениях ключей возникают переходные процессы. Поэтому требуется задержка на время затухания этих процессов между моментом подачи входного кода и моментом считывания значения выходного сигнала.

Метрологические характеристики, подлежащие нормированию для ЦАП, перечислены в разд. 7.2.6.

В редких случаях для контроля работы ЦАП может быть предусмотрена индикация входных кодов. Для этой цели служит оптический двоичный индикатор.

Применение ЦАП:

при построении аналого-цифровых преобразователей;

при построении калибраторов постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления, силы тока, емкости, индуктивности и др.;

при построении систем регулирования и моделирования;

в технике воспроизведения цифровой записи звука и видеоизображения.

Иногда ЦАП может быть использован в качестве умножающего устройства для перемножения значения силы тока  $I_0$  на входной код. Благодаря этому на основе ЦАП может быть создан, например, ваттметр.

## 7.2. Аналого-цифровые преобразователи

### 7.2.1. Аналого-цифровые преобразователи поразрядного уравнивания

АЦП поразрядного уравнивания, принцип действия которого поясняется рис. 46, является довольно популярным. Измеряемое напряжение  $U_x$  подается на сравнивающее устройство – компаратор, на второй вход которого подается компенсирующее напряжение от ЦАП. Максимальное компенсирующее напряжение  $U_{\max}$  с ЦАП соответствует значениям коэффициентов, равным 1. В начальном состоянии все коэффициенты ЦАП  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$  равны 0. При запуске

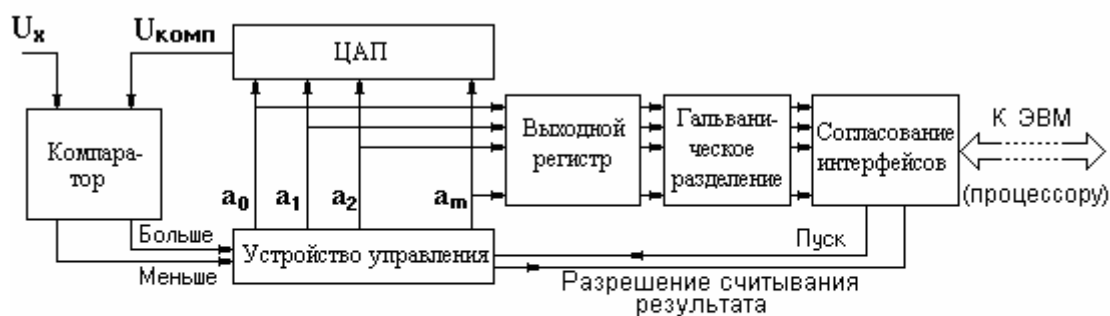


Рис. 46. К принципу действия аналого-цифрового преобразователя поразрядного уравнивания

АЦП устанавливается коэффициент  $a_0 = 1$ , на выходе ЦАП вырабатывается компенсирующее напряжение  $U_{\text{комп}}$ , равное  $U_{\text{комп}} = U_{\text{max}}/2$ , и компаратор начинает сравнивать входное напряжение  $U_x$  с напряжением, поступающим от ЦАП. Если оказалось, что  $U_x > U_{\text{комп}}$ , то компаратор вырабатывает сигнал «мало», и для ЦАП устанавливаются значения коэффициентов  $a_0 = 1, a_1 = 1$ . Новое значение напряжения поступает с ЦАП на вход компаратора, и вновь происходит сравнение. В противном случае, если  $U_x < U_{\text{комп}}$ , компаратор вырабатывает сигнал «много», по которому устройство управления сбрасывает коэффициент  $a_0$  в ноль и устанавливает  $a_1 = 1$ , тем самым устанавливая напряжение  $U_{\text{комп}} = U_{\text{max}}/4$ . Вновь выполняется сравнение  $U_x$  с  $U_{\text{комп}}$ . Всякий раз, когда компаратор выдает сигнал «мало», на вход ЦАП в дополнение к включенным коэффициентам добавляется следующий, а при сигнале «много» предыдущий коэффициент сбрасывается в ноль, а следующий устанавливается равным единице.

Такие операции повторяются до тех пор, пока не будут опрошены все разряды ЦАП. По окончании процедуры во всех линиях, идущих от устройства управления к ЦАП, формируются коэффициенты  $a_0, a_1, \dots, a_m$  в виде наличия или отсутствия напряжения в каждой из них.

Т а б л и ц а 5

**Пример процесса поразрядного уравнивания**

$a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 a_9$	$U_{\text{комп}}$	Компаратор	Последний включенный разряд
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	512	мало	остаётся
1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	$512+256=768$	много	отбрасывается
1 0 1 0 0 0 0 0 0 0	$512+128=640$	много	отбрасывается
1 0 0 1 0 0 0 0 0 0	$512+64=576$	мало	остаётся
1 0 0 1 1 0 0 0 0 0	$576+32=608$	много	отбрасывается
1 0 0 1 0 1 0 0 0 0	$576+16=592$	много	отбрасывается
1 0 0 1 0 0 1 0 0 0	$576+8=584$	мало	остаётся
1 0 0 1 0 0 1 1 0 0	$584+4=588$	много	отбрасывается
1 0 0 1 0 0 1 0 1 0	$584+2=586$	мало	остаётся
1 0 0 1 0 0 1 0 1 1	$586+1=587$	много	отбрасывается
1 0 0 1 0 0 1 0 1 0			

Окончательный результат, равен десятичному 586



Описанный процесс поясняется данными табл. 5, в которой принято, что количество разрядов АЦП, а следовательно и ЦАП равно 10, то есть  $m = 9$ , одному младшему разряду соответствует 1,0 мВ,  $U_{\max} = 1024$  мВ. Измеряемое напряжение  $U_x = 586,5$  мВ. Последовательность строк таблицы – последовательность этапов уравнивания напряжения  $U_x$  компенсирующим напряжением  $U_{\text{комп}}$ . Жирным выделены биты, включаемые принудительно. В последней строке записан окончательный результат, который передается в выходной регистр.

Основная погрешность таких АЦП определяется:

конечной чувствительностью и шумами компаратора, погрешностями изготовления сопротивлений в ЦАП и ограниченным количеством разрядов – аддитивная составляющая погрешности;

нестабильностью тока  $I_0$  ЦАП – мультипликативная составляющая погрешности.

Поэтому в общем случае основная погрешность АЦП поразрядного уравнивания нормируется предельно допустимой относительной погрешностью, которая выражается двучленной формулой.

Динамической характеристикой АЦП поразрядного уравнивания является длительность цикла преобразования или обратная величина – частота преобразований. Погрешность датирования отсчетов таких АЦП не превышает длительности цикла преобразования.

В настоящее время АЦП поразрядного уравнивания обладают следующими предельно достижимыми характеристиками: максимальная частота измерений от 50 Гц (при 24 двоичных разрядах) до 1,0 МГц (при 8 двоичных разрядах).

### **7.2.2. Аналого-цифровые преобразователи “частота – код”**

АЦП подобного вида представляют собой основу для построения цифровых частотомеров, а также самостоятельных АЦП, предназначенных для ввода частоты или сигналов, модулированных по частоте, в компью-

тер. Принцип действия этого АЦП основан на определении частоты, как количества импульсов (или количества периодов периодического сигнала) в единицу времени (рис. 47).

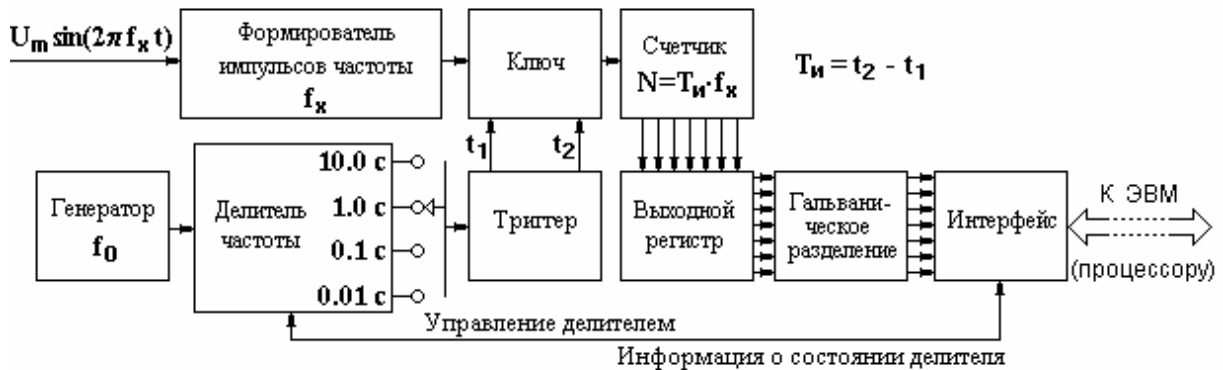


Рис. 47. К принципу действия преобразователя "частота-код"

Из входного периодического сигнала формирователь образует последовательность импульсов, частота которых равна частоте входного сигнала. Ключ открывается на определенное время, которое задается генератором стабильной частоты  $f_0$  и ее делителем. Делитель частоты выполнен переключаемым с тем, чтобы иметь возможность изменять время измерений  $T_{И}$  в зависимости от измеряемой частоты и желаемой точности результата.

Счетчик накапливает прошедшие сквозь ключ импульсы в количестве  $N = T_{И} f_x$  и тем самым формирует код, двоичный или десятичный – в зависимости от его устройства. Двоичный код передается в выходной регистр и далее через устройства интерфейса, снабженные гальванической развязкой, – в компьютер.

Поскольку в данном АЦП измерение выполняется посредством счета импульсов, неизбежна абсолютная погрешность измерения, равная одному импульсу. Относительное значение этой погрешности равно отношению периода измеряемой частоты  $T_x = 1/f_x$  к времени измерения  $T_{И}$ , то есть  $1/(T_{И} f_x)$ .

Если за время измерения измеряемая частота изменялась, то результатом измерения будет среднее значение частоты за это время.

Погрешность подобного АЦП вызывается следующими причинами:

нестабильностью частоты генератора  $f_0$ , задающего время измерений;

соотношением между измеряемой частотой  $f_x$  и временем измерения  $T_{И}$ .

Для таких АЦП нормируется основная относительная погрешность пределом допускаемых значений:

$$\gamma \leq \left( \gamma_{f_0} + \frac{1}{f_x T_{И}} \right) 100\%,$$

где  $\gamma_{f_0}$  – относительная погрешность (нестабильность) частоты  $f_0$ .

Динамической характеристикой АЦП "частота – код" является время измерения. Погрешность датирования отсчетов подобных АЦП не превышает времени измерения.

### **7.2.3. Аналого-цифровые преобразователи “интервал времени – код”**

АЦП данного типа применяются для преобразования в код интервала времени между двумя импульсами или длительности импульсов. В том числе подобные АЦП могут использоваться для преобразования в код периода периодического сигнала с дальнейшим вычислением частоты этого сигнала как величины, обратной периоду. Такое преобразование частоты в код занимает гораздо меньше времени, чем преобразование частоты в код, описанное выше в разд. 7.2.2. Принцип действия подобного АЦП представлен на рис. 48.

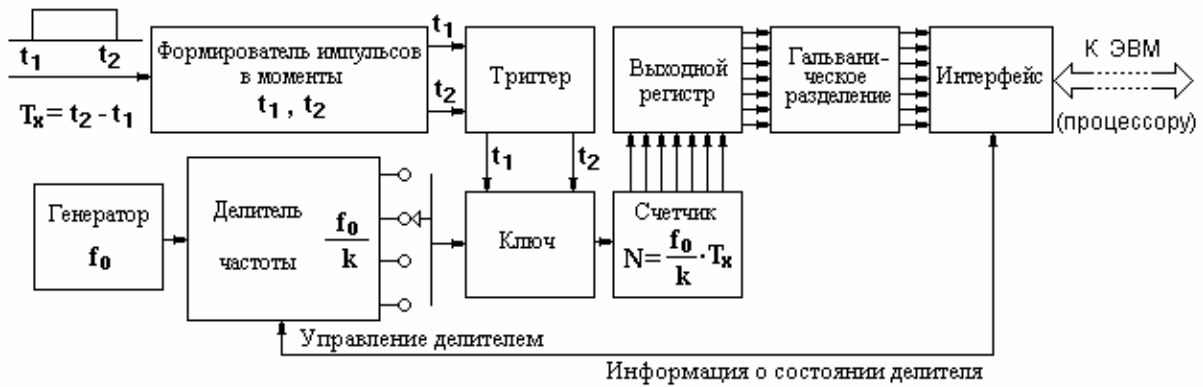


Рис. 48. К принципу действия преобразователя "интервал времени - код"

В моменты  $t_1, t_2$  начала и окончания интервала времени, подлежащего измерению, формирователь вырабатывает импульсы, которые поступают на вход триггера, открывающего ключ на время  $T_x = t_2 - t_1$ . За это время ключ пропускает на счетчик  $N = \frac{f_0}{k} T_x$  импульсов от делителя стабильной частоты, и в этом счетчике формируется код, который затем передается в выходной регистр и далее через интерфейсное сопряжение и гальваническую развязку – в компьютер.

Происхождение погрешностей данного АЦП то же, что и в разд. 7.2.3. Абсолютная погрешность счета импульсов частоты, заполняющей измеряемый интервал, равна одному импульсу. Относительная погрешность равна отношению периода частоты  $T_0 = \frac{k}{f_0}$  к интервалу времени  $T_x$ , то

есть  $\frac{k}{f_0 T_x}$ . Поэтому с учетом нестабильности частоты тактового генератора для таких АЦП нормируется основная относительная погрешность следующей формулой:

$$\gamma \leq \left( \gamma_{f_0} + \frac{k}{f_0 T_x} \right) 100\%.$$

Длительность цикла преобразования такого АЦП равна длительности измеряемого интервала времени, и погрешность датирования отсчетов ее не превышает. Поэтому применение подобных АЦП для измерения частоты

ты путем измерения периода предпочтительнее, чем применение АЦП "частота – код".

#### **7.2.4. Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи**

Интегрирующие АЦП предназначены для преобразования в код медленно меняющегося напряжения с подавлением помех от сети питания. С этой целью в таких АЦП интегрирование выполняется на интервале времени, равном или кратном периоду напряжения в сети электроснабжения. В Европе и Азии период этого напряжения равен 20 мс. В обеих Америках период напряжения равен 1/60 с.

##### **7.2.4.1. Аналого-цифровые преобразователи двойного интегрирования**

Первым действием АЦП двойного интегрирования является интегрирование входного напряжения в течение целого количества периодов помехи (см. рис.49). В это время на вход интегратора подается измеряемое напряжение, возмущенное помехой. Если запуск АЦП состоялся в момент времени  $t_1$ , то момент окончания интегрирования есть  $t_2 = t_1 + nT$ , где  $T$  - период напряжения помехи.

Поскольку частота напряжения сети отличается от 50 Гц незначительно, и АЦП питаются от сети, моменты начала и конца интегрирования синхронизируются от сети, и поэтому время интегрирования в точности равно целому числу периодов напряжения сети:  $T_{\text{инт}} = t_2 - t_1 = nT$ . В момент окончания интегрирования  $t_2$  входные цепи интегратора переключаются так, чтобы на его вход вместо измеряемого напряжения  $U_x$  поступило стабилизированное напряжение  $U_0$  с противоположным знаком (что условно показано на рис.49).

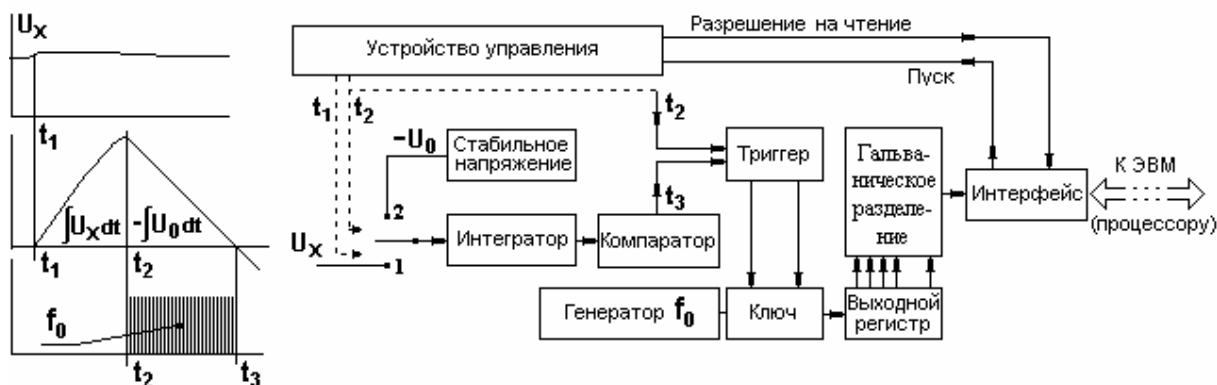


Рис. 49. К принципу действия интегрирующего АЦП

Начиная с этого момента, из напряжения, полученного в результате интегрирования, начинает вычитаться линейное напряжение, которое является продуктом интегрирования постоянного стабилизированного напряжения  $U_0$ . Компаратор фиксирует момент времени  $t_3$ , когда суммарное напряжение оказывается равным нулю. В результате интервал времени  $t_3 - t_2$  оказывается прямо пропорциональным интегралу от входного напряжения, вычисленному за предыдущий интервал времени. Если за это время напряжение  $U_x$ , свободное от помехи, не изменялось, то этот интеграл в свою очередь прямо пропорционален измеряемому напряжению и равен  $nTU_x$ . Поэтому интервал времени  $t_3 - t_2$  прямо пропорционален напряжению  $U_x$ , и в итоге для завершения преобразования остается лишь перевести этот интервал времени в код, предусмотрев умножение на коэффициент пропорциональности. Это выполняется в результате подбора частоты  $f_0$ , которой заполняется интервал времени  $t_3 - t_2$ .

По окончании описанных процедур устройство управления формирует сигнал, разрешающий чтение результата из выходного регистра АЦП.

Из принципа действия интегрирующего АЦП следует, что минимальное время преобразования не может быть меньше 40 мс. Предельно достижимая погрешность подобных АЦП достигает 0.001 % и лучше.

Основная область применения интегрирующих АЦП – создание на их основе цифровых измерительных приборов повышенной точности.

### 7.2.4.2. Сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи

Упрощенная эквивалентная структурная схема АЦП, построенного по принципу сигма-дельта модуляции, представлена на рис. 50. Сокращенно эти АЦП обозначаются, как  $\Sigma\Delta$ -АЦП.

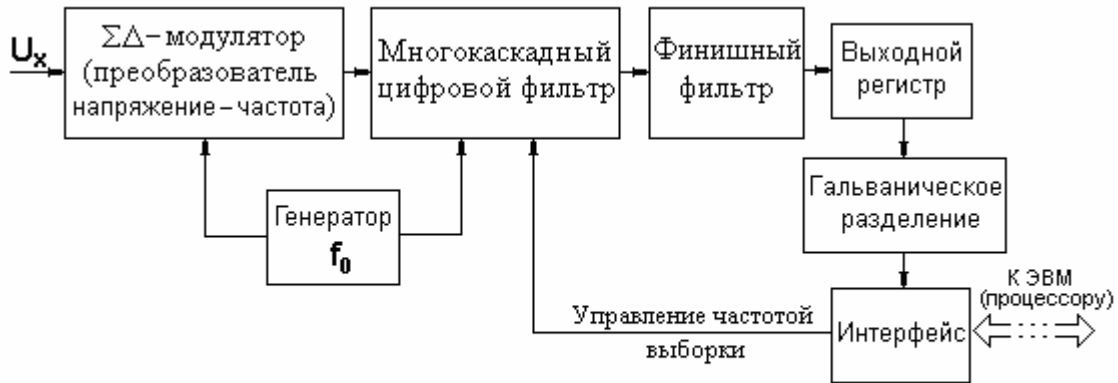


Рис. 50. Типичная структура  $\Sigma\Delta$  АЦП

Генератор тактовой частоты  $f_0$ , которая выбирается в диапазоне 4.0 – 100.0 МГц, инициирует работу  $\Sigma\Delta$ -модулятора, преобразующего входное постоянное напряжение в нерегулярный поток импульсов, средняя интенсивность которого с высокой степенью линейности пропорциональна входному напряжению  $f_{cp} = KU_x$ . Эти импульсы поступают на вход многокаскадного цифрового фильтра, который в большинстве  $\Sigma\Delta$ -АЦП выполняет подсчет поступивших импульсов за время, равное  $n$  периодам частоты  $f_0$ , благодаря чему в АЦП реализуется интегрирование в течение времени  $n/f_0$ . Число  $n$  может достигать значения 256 и более.

$\Sigma\Delta$ -модулятор может состоять из нескольких звеньев, число которых  $k$  обуславливает обозначение порядка  $\Sigma\Delta$ -АЦП. Вследствие высокой частоты  $f_0$  и относительно длительного времени интегрирования, выражающегося числом  $n/f_0$ , амплитудно-частотная характеристика  $\Sigma\Delta$ -АЦП обычно представляется в таком же виде, как это принято для аналоговых преобразователей:

$$A\left(\frac{f}{f_0}\right) = \left| K\left(j \frac{f}{f_0}\right) \right| = \frac{\left| \sin\left(\frac{\pi n f}{f_0}\right) \right|^k}{\left| n \sin\left(\frac{\pi f}{f_0}\right) \right|},$$

где  $k$  – порядок АЦП.

Количество каскадов цифрового фильтра обычно не меньше  $k$ . После него иногда включают финишный фильтр, выполняющий дополнительные функции, например, выравнивание АЧХ.

В таких АЦП длительность времени интегрирования меняется по командам от компьютера, и тем самым регулируется быстродействие АЦП в зависимости от предполагаемой скорости изменения входного сигнала. Это регулирование осуществляется изменением параметров цифрового фильтра.

Современные  $\Sigma\Delta$ -АЦП позволяют выполнять от двух – трех до 60 000 измерений в секунду. Точность таких АЦП достигает сотых и нескольких тысячных долей процента. Незначительное неудобство  $\Sigma\Delta$ -АЦП заключается в том, что при ступенчатом изменении входного сигнала (обычно напряжения), происходящем в многоканальных измерительных системах при переключении каналов, в АЦП возникает переходный процесс, порожденный цепочкой фильтров. В результате первые несколько измерений после переключения выполняются со значительной погрешностью. Количество таких измерений в зависимости от режима работы АЦП может составлять от 3 до 8. Это следует иметь в виду при использовании  $\Sigma\Delta$ -АЦП после коммутатора в многоканальных измерительных системах.

В последнее время этот недостаток  $\Sigma\Delta$ -АЦП преодолевается тем, что в многоканальных системах применяют многоканальные  $\Sigma\Delta$ -АЦП, такие, что в их составе параллельно действуют несколько АЦП. В этих условиях каждый АЦП непрерывно работает только на одном канале, и коммутатор не требуется.

### **7.2.5. Метрологические характеристики аналого-цифровых и цифроаналоговых измерительных преобразователей**

Для аналого-цифровых преобразователей нормируются следующие метрологические характеристики:



диапазон изменения входного сигнала измерительной информации;  
для линейных АЦП – пределы допускаемой основной **относительной** погрешности, нормируются двучленной формулой (22) путем задания коэффициентов  $c$  и  $d$ ; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих;

для АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного напряжения (тока) – предел допускаемой основной **приведенной** погрешности;

входное сопротивление (импеданс);

вид выходного кода и количество разрядов;

цена единицы младшего разряда выходного кода;

пределы допускаемой дополнительной погрешности;

максимальная частота измерений (выражается в Гц) или длительность цикла одного преобразования (выражается в Гц), указываются с учетом быстродействия устройств связи с компьютером и дисциплины организации этой связи;

погрешность датирования отсчетов, указывается с учетом быстродействия устройств связи с компьютером и дисциплины организации этой связи.

Для АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного напряжения (тока), приводится номинальная функция преобразования.

В соответствии с ГОСТ 8.401 класс точности линейного АЦП обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы, разделенными косой чертой:  $c/d$ . Класс точности АЦП с заданной нелинейной функциональной зависимостью выходного кода от входного напряжения (тока) обозначается одной цифрой, равной пределу допускаемой приведенной погрешности.

Производитель АЦП вправе нормировать основную приведенную погрешность одним числом.

Если на входе АЦП включен аналоговый инерционный преобразователь (например, фильтр), как это показано на рис. 16, то нормируются ди-

намические характеристики этого преобразователя, чаще всего – время реакции.

Для цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) нормируются следующие метрологические характеристики:

вид входного кода, диапазон его возможных значений, номинальная цена единицы младшего разряда входного кода;

диапазон изменения величины на выходе ЦАП, соответствующий диапазону значений входного кода;

выходное сопротивление или выходной импеданс, указывается номинальное значение и допускаемые пределы отклонения от него;

пределы допускаемой основной относительной погрешности, нормируются двучленной формулой 22 путем задания коэффициентов  $c$  и  $d$ ; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется отдельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих;

пределы допускаемых дополнительных погрешностей - для каждой влияющей величины нормируются отдельно;

время реакции выходного сигнала на изменение входного кода на величину, равную 80% от диапазона значений этого кода.

В случаях, когда ЦАП проектируется, как нелинейный, указывается номинальная функция преобразования.

Основная погрешность в этом случае нормируется пределом допускаемой приведенной погрешности. Она включает в себя возможные отклонения реальных функций преобразования конкретных экземпляров ЦАП.

Кроме перечисленных метрологических характеристик АЦП и ЦАП в некоторых случаях нормируются характеристики:

интегральная нелинейность – максимальное отклонение значений функции преобразования АЦП или ЦАП от номинальной линейной функции, нормируется в %% от верхнего значения выходного сигнала;

дифференциальная нелинейность, то есть различие цены единицы младшего разряда выходного кода (для АЦП) или входного кода (для ЦАП) во всем диапазоне измерения (для АЦП) или воспроизведения (для ЦАП).

### 7.2.6. Связь цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей с компьютером

Связь АЦП с компьютером осуществляется в соответствии с протоколами обмена информацией, который стандартизован для того или иного интерфейса.

Наиболее популярными интерфейсами, обеспечивающими взаимную связь между компьютером и автономным АЦП, являются RS 232 (COM - порт), RS 485, USB, IEEE 488, IEEE 1394.

Для АЦП, встраиваемых в компьютеры, интерфейсом является интерфейс компьютера, а именно, интерфейс PCI или интерфейс портативных компьютеров (ноутбуков) PCMCIA.

Сравнительные характеристики интерфейсов приведены ниже в таблице 1.

Внутренние интерфейсы компьютера имеют характеристики:

PCI – от 4 до 20 входов в промышленных компьютерах, скорость обмена 132 Мбайт/с,

PCMCIA – до 3 входов в портативных компьютерах, скорость обмена до 1.0 Мбайт/с.

Таблица 1

**Сравнительные характеристики интерфейсов для АЦП**

Тип интерфейса	RS 232	RS 485	USB
Скорость обмена	30 бит/с -115Кбит/с	До 10 Мбит/с	До 12 Мбит/с
Количество устройств	1	31	127
Количество проводов	9	9	4
Расстояние, м	17	1200	5

В последнее время широкое распространение получили беспроводные интерфейсы, такие как Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee и другие. При работе с ними гальваническая развязка между выходным регистром и устройством интерфейсного сопряжения не требуется.

### 7.3. Цифровые измерительные приборы

Цифровые измерительные приборы отличаются от измерительных преобразователей тем, что выходные данные приборов должны быть пред-

ставлены человеку-оператору в удобной для него форме. Поэтому для построения цифровых измерительных приборов используются АЦП, снабженные средствами ручного управления и визуального представления результатов измерений, как это представлено на рис. 51. Цифровые приборы некоторых типов снабжены устройствами интерфейсного сопряжения с компьютером, которые могут передавать в компьютер результаты измерений, а также служебную информацию о позиции, в которой находятся средства ручного управления.

На рис. 51 представлены возможные варианты цифровых измерительных приборов. Самые простые варианты без подключения преобразователей на входе – это частотомеры и периодомеры, которые создаются на базе соответствующих АЦП, описанных ранее в разделах. 7.2.2, 7.2.3. Частотомеры и периодомеры обычно совмещаются в одном корпусе.

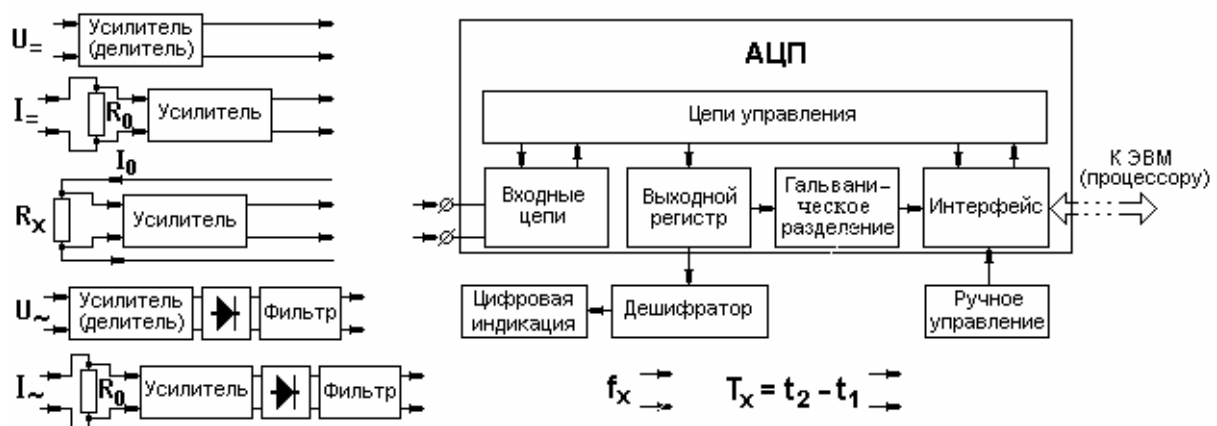


Рис. 51. Варианты цифровых измерительных приборов

На базе АЦП других разновидностей – поразрядного уравнивания, интегрирующих – могут быть созданы вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока, а также омметры. Для этого к АЦП присоединяются входные преобразователи, показанные в левой части рис. 51. Обычно в одном корпусе с АЦП помещаются несколько преобразователей, каждый из которых присоединяется к АЦП с помощью переключателя, управляемого вручную или от компьютера. Подобные приборы называются *мультиметрами*. Наиболее точные мультиметры, предназначенные для

измерения постоянного напряжения, силы постоянного тока и сопротивления, создаются на базе интегрирующих АЦП.

В последнее время вольтметры и амперметры переменного тока создаются без выпрямительных преобразователей. Принцип действия таких приборов заключается в выполнении измерений в два этапа.

На первом этапе выполняются очень быстрые измерения мгновенных значений входного переменного напряжения или силы тока. Частота измерений должна превышать частоту первой гармоники измеряемого сигнала в несколько десятков раз. На втором этапе по результатам этих измерений выполняются вычисления требуемых характеристик, а именно амплитудных, действующих или средневыпрямленных значений. Результаты таких измерений не будут зависеть от формы кривой напряжения или тока, и при достаточной скорости измерений мгновенных значений время измерений не превысит одного периода измеряемого сигнала.

Цифровые измерительные приборы других физических величин создаются подсоединением на входе АЦП измерительных преобразователей этих величин в напряжение, силу тока, частоту, интервал времени или в изменение сопротивления. Цифровой индикатор и средства ручного управления остаются. Наличие интерфейсного сопряжения с компьютером не обязательно.

В большинстве случаев при нормировании характеристик погрешности цифровых приборов учитываются обе составляющие погрешности: мультипликативная и аддитивная. Поэтому для цифровых приборов основная *относительная* погрешность нормируется *двучленной формулой* (22).

*Метрологические характеристики, нормируемые для цифровых приборов:*

диапазон измерения;

пределы допускаемой основной **относительной** погрешности, нормируются двучленной формулой (27) путем задания коэффициентов  $c$  и  $d$ ;

входное сопротивление (импеданс), нормируется только для электроизмерительных приборов;

количество разрядов, представляемых на индикацию;

цена единицы младшего разряда индикации результатов измерений;

вид, число разрядов и цена единицы младшего разряда выходного кода, нормируется при наличии связи с компьютером или печатающим устройством;

пределы допускаемой дополнительной погрешности;

максимальная частота измерений, выражается в герцах (Гц), или длительность цикла одного преобразования, выражается в секундах ( $c$ );

погрешность датирования отсчетов;

максимальная скорость обмена информацией с внешними устройствами, нормируется в случаях, когда такая связь предусмотрена.

Класс точности цифровых приборов в соответствии с ГОСТ 8.401 обозначается двумя цифрами, равными коэффициентам двучленной формулы, разделенными косой чертой:  $c/d$ .

Если цифровой прибор предназначен для выполнения измерений в динамическом режиме с записью результатов в устройство памяти или компьютер, а на его входе включен аналоговый инерционный преобразователь (например, фильтр, см. рис. 13), то нормируются динамические характеристики этого преобразователя.

Точно так же нормируются метрологические характеристики измерительных каналов ИИС, которые содержат аналоговые инерционные преобразователи и заканчиваются аналого-цифровым преобразованием. Для них нормирование динамических характеристик аналоговой части обязательно. Для цифровых приборов и измерительных каналов ИИС обычно достаточно нормировать частные динамические характеристики, такие как время реакции или границы частотной полосы.

Нормы на максимальную частоту измерений, длительность цикла преобразования и на погрешность датирования отсчетов в измерительном канале ИИС должны устанавливаться с учетом быстродействия системы обмена информацией в ИИС и дисциплины этого обмена.

Производитель цифровых приборов и ИИС вправе нормировать погрешности выпускаемых средств измерений не двучленной формулой, а пределом допускаемой основной приведенной погрешности.

#### **7.4. Помехи и борьба с ними**

На качество работы высокочувствительных электронных приборов, в том числе цифровых, существенное влияние оказывают *поперечные* помехи (помехи *нормального вида*  $U_{\text{пп}}$ ) и *продольные* помехи (помехи *общего вида*, *синфазные помехи*  $U_{\text{пд}}$ ). Эти помехи представлены на рис. 52, на котором через ВП и НП обозначены высокопотенциальный и низкопотенциальный зажимы прибора.

Поперечные помехи – это помехи, которые складываются с сигналом. Они возникают в результате действия внешних электромагнитных полей за счет взаимной индуктивности и паразитной емкости, которые существуют всегда.

Причины возникновения продольных помех:  
высокое сопротивление контуров заземления;

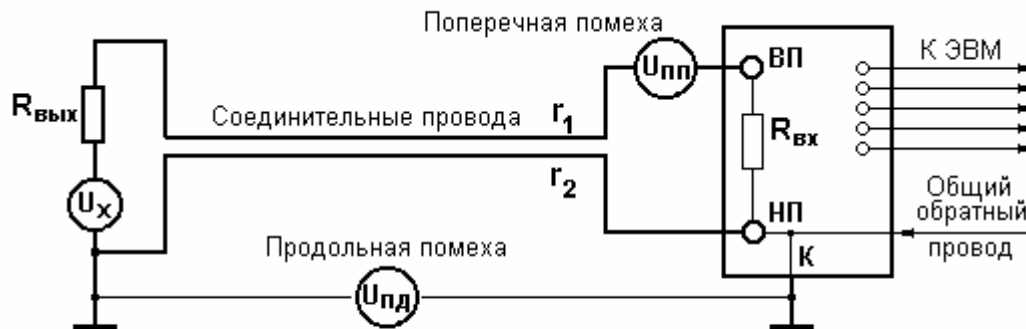


Рис. 52. Происхождение продольной и поперечной помех

удаленность друг от друга точек заземления корпуса датчика (или иного измерительного блока) и корпуса прибора; это заземление делается в соответствии с требованиями техники безопасности;

блуждающие токи в контурах заземления и в среде, находящейся между точками заземления.

К продольным помехам относятся также помехи, которые возникают в общем проводе электронной схемы. Чаще всего такие помехи возникают в интерфейсных сопряжениях, когда для всех проводов интерфейса общим проводом является всего один обратный провод, как это показано на рис. 52.

В итоге продольные помехи преобразуются в поперечную помеху за счет различия сопротивлений в контуре информационной цепи: в верхней

части цепи сопротивление больше, чем в нижней на сумму выходного сопротивления источника сигнала  $R_{\text{вых}}$  и входного сопротивления приемника  $R_{\text{вх}}$ .

Средство борьбы с поперечными помехами:

скручивание двух информационных проводов, за счет чего уменьшается площадь витка, который образован этими проводами, такие провода называются *витой парой*;

экранирование входной цепи, введенный экран не должен иметь гальванической связи с входной цепью и с корпусом, экран заземляется в одной точке с точкой заземления источника;

фильтрация сигналов, в частном случае – интегрирование,

пропускание информационных проводов сквозь одно отверстие в корпусе прибора.

Средства борьбы с продольными помехами:

гальваническое разделение входных цепей приемника информации от цепи заземления корпуса, благодаря чему практически разрывается цепь, через которую продольная помеха попадает на вход прибора (преобразователя);

гальваническое разделение выходных цифровых цепей с помощью оптоэлектронных пар, благодаря чему обратные токи всех линий интерфейса, циркулирующие в единственном общем обратном проводе, не создают падения напряжения на общем проводе электронной схемы прибора (преобразователя),

гальваническое разделение цепи питания 220 В от внутренних электронных цепей с помощью трансформатора.

Перечисленные средства борьбы с помехами приведены на рис. 53.

На этом рисунке обозначено: ВП и НП – высокопотенциальный и низкопотенциальный зажимы, Э – зажим плавающего экрана, К – зажим корпуса, предназначенный для заземления в целях обеспечения безопасности персонала. Между выходным регистром и устройством интерфейсного сопряжения включено устройство оптического гальванического разделения на оптопарах: на стороне источника – светодиод, на стороне приемника –



фотодиод или фототриод. В одной микросхеме может быть размещено до десяти таких оптопар.

Экран и общий провод схемы могут быть заземлены только в одной точке. Если общий провод заземлен у источника (см. рис. 53), то его нельзя заземлить у входа в устройство. Наоборот, если общий провод у источника не заземлен, можно соединить клеммы НП и К. Точно так же поступают с заземлением экрана. Его заземляют либо у источника, либо на входных зажимах принимающего устройства (прибора, преобразователя).

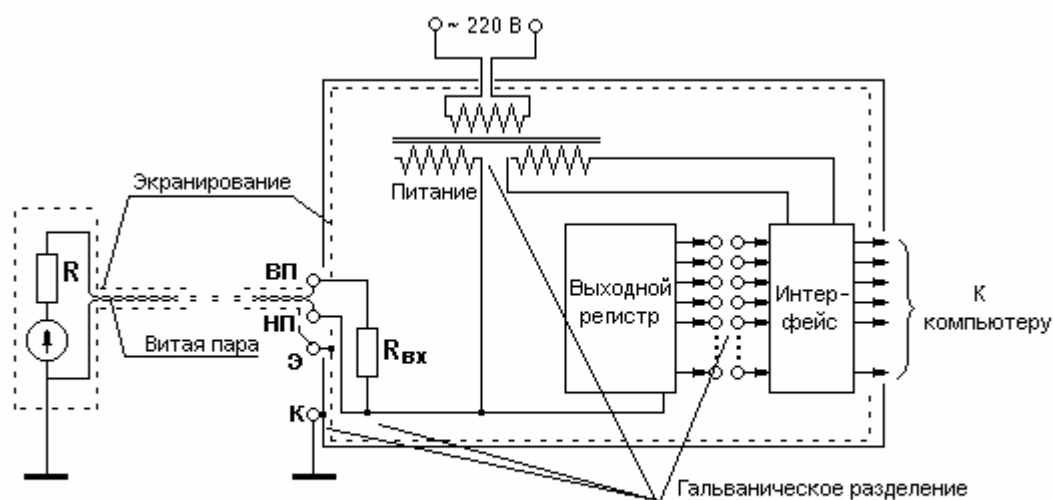


Рис. 53. Средства борьбы с помехами

На рис. 53 не показано еще одно важное средство борьбы с помехами, которое состоит в гальваническом разделении линии, по которой передается сигнал измерительной информации, от источника (например, от датчика). Устройство такого гальванического разделения должно быть расположено непосредственно на входе принимающей части канала. В качестве этого устройства обычно применяются 2 трансформатора с двумя прерывателями: на входе перед первичной обмоткой первого трансформатора и на выходе после вторичной обмотки второго. Эти два прерывателя работают синхронно и обеспечивают преобразование постоянного напряжения в переменное (на первичной обмотке трансформатора) и переменного напряжения в постоянное (на вторичной обмотке трансформатора). Оптоэлектронная развязка здесь не применяется из-за того, что она не обеспечивает достаточной точности передачи, в то время как трансформаторная

развязка может обеспечить точность до (0,01 – 0,02) %. В качестве устройства трансформаторной гальванической развязки линий передачи сигнала измерительной информации используют гальванически развязанные преобразователи DC/DC, которые выпускаются серийно.

Гальванически развязанные отдельные части измерительного канала могут заземляться независимо друг от друга.

В заключение отметим, что гальваническое разделение высокочастотных сигналов ухудшается с ростом частоты сигнала. Это происходит потому, что с увеличением частоты сигнала измерительной информации повышается проводимость между изолированными частями устройств гальванического разделения из-за паразитной емкости, которая может достигать 100 пФ.

## **8. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

### **8.1 Средства и методы измерения температуры**

Рассмотрены основные первичные преобразователи (датчики, сенсоры) температуры, применяемые в промышленности. Эти датчики делятся на две группы: *генераторные* и *параметрические*. Генераторные датчики основаны на применении термоэлектрического эффекта, открытого в 1823

году Т. Зеебеком. Генераторные датчики температуры называются термоэлектрическими датчиками, они не требуют питания, поскольку являются источниками термоэдс, которая возникает вследствие разности работы выхода электронов из разных металлов.

Принцип действия параметрических датчиков температуры заключается в использовании зависимости от температуры сопротивления, которое оказывают металлы электрическому току. Такие датчики температуры называются термопреобразователями сопротивления, и их практическое применение невозможно без источника тока.

### 8.1.1. Термоэлектрические датчики температуры

Термоэлектрический промышленный датчик температуры, как правило, представляет собой два провода из различных металлов, одни концы которых соединены между собой (так называемые *горячие концы*), а вторые концы (*холодные концы*) подводят термоэдс ко входу последующих приборов, измеряющих эту термоэдс, либо ко входу вторичных электронных измерительных преобразователей. Эти два провода со спаянными концами называются *термопарой*. Для защиты горячих концов термопары от воздействия среды, в которую погружается датчик и которая может оказаться абразивной или агрессивной, их обычно размещают внутри защитной оболочки, заполненной сыпучим электроизоляционным материалом, фиксирующим положение горячего конца термопары относительно защитного корпуса.

Поскольку термоэдс зависит от разности температур горячих и холодных концов термопары:

$$E(t^{\circ}) = f(t^{\circ} - t_0^{\circ}),$$

в идеальном случае холодные концы термопары должны находиться при температуре тающего льда, то есть при  $t_0^{\circ} = 0^{\circ}C$  (рис. 54 а). Однако, такая температура в промышленных условиях не может воспроизводиться постоянно. Поэтому в реальных ситуациях применяют один из двух способов компенсации температуры холодных спаев термоэлектрического датчика температуры (рис. 54 б, в).

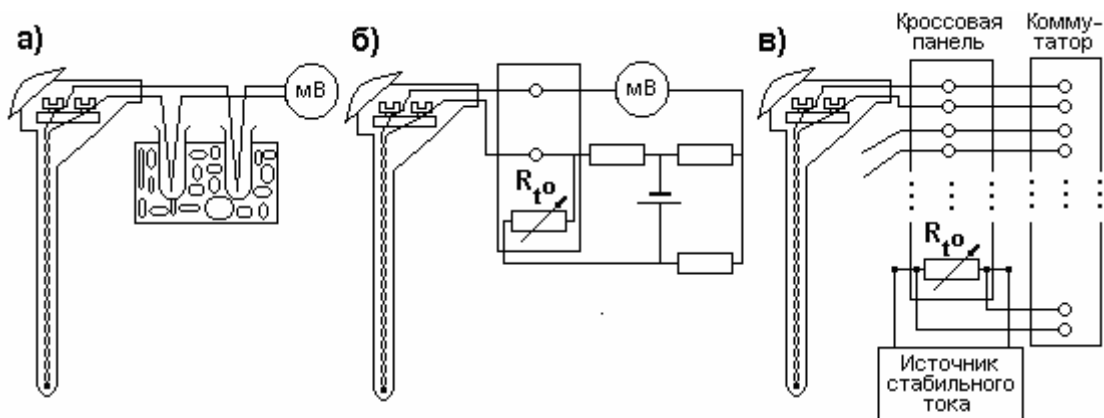


Рис. 54. Схемы включения термоэлектрических датчиков

Первый способ заключается в следующем. Холодные концы соединены с зажимами, расположенными при одинаковой температуре. Отсутствие градиента температуры между зажимами обеспечивается благодаря заключению их в закрытый ящик или за счет подкладывания массивной медной плиты под плату с зажимами, изолированными от плиты. В ящик или на плиту устанавливается медный термометр сопротивления  $R_{t0}$ , включенный в мост. Этот мост уравнивается при температуре термометра сопротивления, равной нулю. Если температура места подсоединения холодных спаев отличается от нуля, мост выходит из равновесия, и в его измерительной диагонали возникает напряжение, которое компенсирует отличие температуры холодных спаев от нуля.

Второй способ применяется в случаях, когда с помощью одного прибора или ИИС выполняются измерения температуры в нескольких точках объекта. В этих случаях холодные концы термопар подводятся к одной кроссовой панели, снабженной системой выравнивания температуры во всех точках панели. На этой панели устанавливается медный термометр сопротивления  $R_{t0}$ , через который протекает стабильный ток  $I_0$ . Все каналы измерения температуры опрашиваются коммутатором, в том числе в каждом цикле опроса опрашивается также канал измерения температуры кроссовой панели и, следовательно, холодных концов всех термопар. Результат этого измерения используется микропроцессором или компьюте-

ром для того, чтобы вычислить и ввести поправку на температуру холодных спаев во все результаты измерений.

Материалы, из которых изготавливаются промышленные термопары: платина (термопары ТПП), сплавы платины с родием (термопары ТПР), хромель и алюмель (термопары ТХА), хромель и копель (термопары ТХК), нихросил и нисил (термопары НН). Для высокотемпературных термопар применяются вольфрам и рений. Функции преобразования (градуировочные характеристики) стандартных термопар приведены в ГОСТ 3044. Конструктивное исполнение (диаметр, длина погружаемой части, крепежные размеры и т. д.) всех термопар кроме НН приведены в ГОСТ 6616. Термопары НН обладают повышенной стабильностью характеристик. Они появились примерно 50 лет назад в Австралии и изготавливаются из двух сплавов нихросил (сплав никеля, хрома и кремния) и нисил (сплав никеля и кремния) в виде кабеля диаметром от двух до восьми миллиметров. Этот кабель представляет собой гибкую металлическую трубку с размещенными в ней одной или двумя парами термоэлектродов. Пространство вокруг термоэлектродов заполнено уплотненной изоляцией, например, окисью алюминия. Для получения рабочей термопары заготовка (то есть описанный кабель) отрезается, оголившиеся концы термоэлектродов свариваются и на них надевается защитная крышка. Другие концы термоэлектродов выводятся на специальную плату и могут быть протянуты вплоть до кроссовой панели уже вне кабеля.

В табл. 2 представлены примерные характеристики наиболее распространенных промышленных термоэлектронных датчиков температуры.

Таблица 2

**Характеристики термоэлектронных датчиков температуры**

Тип датчика	Пределы измерений °С	Выходное напряжение мВ	Пост. врем. с	Абсолютная погрешность °С
ТПП. Платина – платина-родий (10% родия)	-20 – 1300. Кратковременно – до 1600.	Минус 0,02 – 13	40.0 60.0 210.0	1 – 3

ТПР. Платина-родий (6%родия) Платина-родий (30%родия)	300 – 1600. Кратковременно – до 1800.	0 – 11	40.0 60.0 210.0	1 – 5
ТХА. Хромель – алюмель	Минус 50 – 1000. Кратковременно – до 1300.	Минус 1.86 – 41	40.0 60.0 210.0	3 – 10
ТХК. Хромель – копель	Минус 50 – 600. Кратковременно – до 800.	Минус 3 – 49	40.0 60.0 210.0	2 – 6
НН. Нихросил – нисил	Минус 50 – 1200.	Минус 2 – 50	-	2 – 7
Вольфрам 5% – рений 20 %	0 – 2200. Кратковременно – до 2500.	0 – 34	40.0 60.0 210.0	5 – 10

Обычно на промышленных предприятиях датчик удален от прибора или системы на расстояние до километра. Такая ситуация характерна, например, для атомных электростанций. Поэтому использовать в качестве линий связи датчика с прибором те же провода, из которых выполнена термопара, в ряде случаев невыгодно. Особенно это относится к платиновым и платинородиевым термопарам. Поэтому для соединения термопар с прибором или системой используются *удлинительные термоэлектроды*. Эти электроды должны удовлетворять двум условиям.

Первое условие: места присоединения удлинительных электродов к основным термоэлектродам (обычно в головке термопары, см. рис. 54) должны иметь одинаковую температуру.

Второе условие: удлинительные электроды в местах присоединения должны иметь ту же термоэдс, которую имеют в этих местах основные электроды (обычно в диапазоне температур от 0 до 200° С).

Для платиновых термопар применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП (медь 99,4 %, никель 0,6 %), для термопары ТХА – из меди и константана, для ТХК – основные термоэлектроды, выполненные в виде гибких проводов. Для нихросил-нисловых термопар удлинительными проводами являются провода из этих же материалов.

Из табл. 2 следует, что промышленные термопары, заключенные в массивные оболочки, предназначены для измерения практически постоянной или очень медленно изменяющейся температуры, их тепловая инерция довольно велика. Исключением являются нихросил-нисловые термопары, тепловая инерция у них гораздо меньше, их постоянная времени может меняться в широких пределах, поэтому в таблице она не указана.

Однако в ряде случаев в народном хозяйстве, а также при научных исследованиях возникает задача измерения быстро изменяющихся температур, спектр которых распространяется до частот 50–80 кГц. Для измерения таких температур применяются сверхминиатюрные термопары, в том числе открытые. Эти термопары изготавливаются из проволоки диаметром 10–20 мкм, диаметр горячего спая достигает 0,2 мм. Постоянная времени подобных термопар составляет 0,003–0,01 с. Схемы включения подобных термопар аналогичны схемам, представленным на рис. 54.

Основные источники погрешностей измерения температуры с помощью термопар:

погрешности применения, вызванные неверным монтажом, ошибками в заглублении термопар, движением среды и др.;

инструментальные погрешности, вызванные собственным сопротивлением основных термоэлектродов, погрешностями компенсации температуры холодных спаев, погрешностями и разбросом характеристик, окислением термоэлектродов.

### **8.1.2. Термопреобразователи сопротивления проволочные**

Термопреобразователи сопротивления – параметрические датчики температуры, поскольку от температуры зависит параметр резистора, а именно его сопротивление постоянному току. Общие технические требования, методы испытаний и градуировки промышленных термопреобразо-

вателей сопротивления приводятся в ГОСТ 6651. Широко распространены два вида термопреобразователей сопротивления – платиновый и медный. Их основные характеристики приведены в таблице 3. Выпускаются также никелевые термопреобразователи сопротивления.

Поскольку датчики параметрические, для измерения их параметра - сопротивления через них приходится пропускать ток и измерять падение напряжения на этом сопротивлении  $U_R$ . Сила тока, рекомендуемая действующей нормативной документацией для пропускания через термопреобразователь сопротивления, выбирается из ряда

0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20,0; 50,0 мА.

Понятно, что при этом нельзя допускать перегрева термосопротивления, ибо этот перегрев будет вызывать погрешность результата измерений. Допустимый перегрев указан в табл. 3, и верхнее значение допустимой силы тока может быть получено по формуле:  $I \leq 2d\sqrt{d\Delta t^\circ}$ , где  $\Delta t^\circ$  – температура перегрева, d – диаметр провода (мм), из которого изготовлен термопреобразователь сопротивления.

Таблица 3

**Характеристики промышленных термометров сопротивления**

Тип термометра	Класс точности	Пределы измерения, °С	Абсолютная погрешность, °С	Сопротивление при $t^\circ = 0$ Ом	Температура собственного нагрева °С	Постоянная времени с
ТСП платиновый	А	-200... +650	$0.15+0.002  t^\circ $	1,0 10 50	< 0,2	9 80
	В	-200... +650	$0.3+0.006  t^\circ $	100		240
ТСМ медный	А	-50... +180	$0.3+0.0035  t^\circ $	10 50	<0,4	9 80
	В	-50... +180	$0.3+0.006  t^\circ $	100		240



При нулевой температуре сопротивление термопреобразователя не равно нулю. Поэтому схема включения термопреобразователей сопротивления должна быть такой, чтобы при нулевой температуре выходной сигнал этой схемы был равен нулю. Это достигается двумя способами.

Первый из них заключается в том, что термопреобразователь сопротивления включается в мост, который уравнивается при температуре термосопротивления, равной нулю, и при других температурах работает в неравновесном режиме. Схема такого моста приведена на рис. 55. Здесь

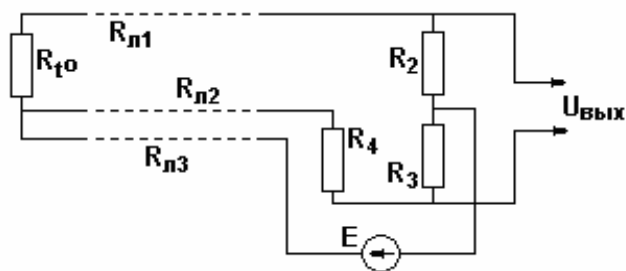


Рис. 55. Схема включения в мост удаленного термосопротивления

учтено удаление датчика от остальной части схемы на значительное расстояние, и поэтому применяется трехпроводное включение датчика, такое, чтобы сопротивления линий связи  $R_{Л1}$ ,  $R_{Л2}$  не влияли на результат измерения.

В самом деле, сопротивление  $R_{Л3}$  на результат измерения практически не влияет вообще, поскольку включено последовательно с источником питания. Сопротивления двух других линий  $R_{Л1}$ ,  $R_{Л2}$ , включены в противоположные плечи моста. Условие равновесия моста в этом случае записывается в виде

$$(R_{t^0} + R_{Л1})R_3 = (R_4 + R_{Л2})R_2,$$

откуда получим:

$$R_{t^0} R_3 + R_{Л1} R_3 = R_4 R_2 + R_{Л2} R_2.$$

Если обеспечить  $R_2 = R_3$ , что достигается легко, и  $R_{Л1} = R_{Л2}$ , то влияние линий Л1 и Л2 исключается полностью. Обеспечить второе из этих условий удастся не всегда. Поэтому в эти линии включаются последовательно два стабильных резистора, сопротивления которых равны примерно 10 Ом. Один из этих резисторов регулируемый. При включенном датчике и при равенстве нулю его температуры путем регулировки одного из этих резисторов добиваются равновесия моста. Сопротивления 10 Ом достаточно, чтобы замаскировать возможную разность сопротивлений проводов в

линиях, вызванную неоднородностью проволоки и материала, из которых она изготовлена.

Другой способ достижения нулевого выходного сигнала при нулевой температуре реализуется численным методом, для чего в составе средства измерений должен быть предусмотрен микропроцессор или компьютер. В этом случае удаленный термопреобразователь подсоединяется к прибору или системе по четырехпроводной схеме, показанной на рис. 56.

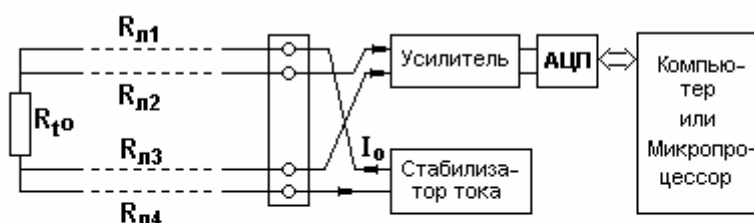


Рис. 56. Четырехпроводная схема включения удаленного термопреобразователя сопротивления

В этой схеме при условии применения усилителя с очень большим входным сопротивлением размером от 1.0 до 10.0 МОм и более влияние соединительных проводов и контактов устраняется практически полностью, поскольку их сопротивление пренебрежимо мало по сравнению с входным сопротивлением усилителя.

Нулевое выходное напряжение при нулевой температуре достигается вычитанием из каждого результата падения напряжения на сопротивлении  $R_{t^0}$ , которым обладает термопреобразователь при  $t^0 = 0^0 \text{C}$ .

### 8.1.3. Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления отличаются от металлических меньшими габаритами, обратной зависимостью сопротивления от температуры, сильной нелинейностью этой зависимости и большим по абсолютной величине температурным коэффициентом сопротивления.

Зависимость сопротивления полупроводниковых терморезисторов от температуры удовлетворительно описывается формулой

$$R_{t^0} = Ae^{B/t^0},$$

где  $A$  – коэффициент, имеющий размерность сопротивления, Ом;  $B$  – коэффициент, имеющий размерность температуры.

Номинальное значение сопротивления терморезисторов нормируется для различных температур (20 и 150<sup>0</sup>С) и колеблется в широких пределах от единиц ом до сотен килоОм. Их постоянная времени зависит от конструктивных особенностей и изменяется в пределах 0.1 – 30 с.

Недостатком полупроводниковых терморезисторов является значительный разброс характеристик и невысокая стабильность параметров во времени. По этим причинам терморезисторы применяются, как правило, в качестве чувствительного элемента теплового реле.

#### **8.1.4. Другие виды термометрических измерений**

##### **8.1.4.1. Пирометры**

В ряде отраслей промышленности, например, в металлургии возникает необходимость бесконтактного измерения температуры. Такие измерения происходят при недоступности объекта или когда температура объекта слишком высока и взаимодействующий с ним датчик может выйти из строя, в частности, расплавиться. В этих случаях применяют средства измерений, в которых реализуются пирометрические методы измерения температуры или методы, основанные на тепловидении.

К пирометрическим методам измерения температуры относятся *пирометры полного излучения (радиационные пирометры)*, *пирометры частичного излучения (яркостные пирометры)* и *пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры)*.

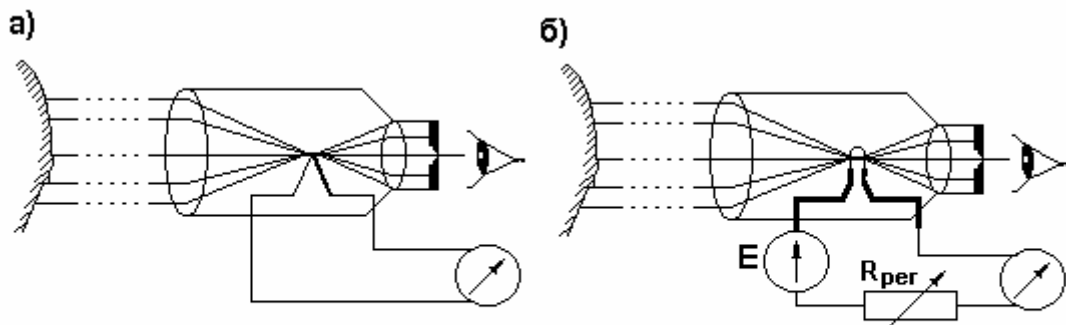


Рис. 57. Принципиальная схема пирометров: радиационного а) и яркостного б)

Принцип действия радиационных пирометров основан на том, что по закону Стефана-Больцмана интегральная мощность излучения абсолютно черного тела (АЧТ) зависит от температуры:  $M_T^0 = \sigma T^4$ , где  $\sigma \cong 5.67 \cdot 10^{-8} \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$ . Однако для реального тела эта зависимость может сильно изменяться в зависимости от состояния его поверхности и от материала. Пирометр, отградуированный по излучению АЧТ, покажет в реальности радиационную температуру  $T_p = \sqrt[4]{\epsilon} T$ , где  $0.04 \leq \epsilon \leq 1$  - коэффициент теплового излучения.

Схема радиационного пирометра представлена на рис. 57, а. Пределы измерения такого пирометра (400 – 3000)°С. Излучение объекта воспринимается пирометром, фокусируется и попадает на термопару, находящуюся в фокусе линзы. Возникающая термоэдс пропорциональна температуре, при которой находится термопара. Эта термоэдс измеряется любым милливольтметром. Задачей оператора является наведение объектива пирометра на объект.

В яркостных пирометрах используется зависимость мощности излучения от температуры в ограниченном диапазоне длин волн излучения. В таких пирометрах обычно применяется красный светофильтр, пропускающий излучения с длинами волн 0.648 – 0.664 мкм. И здесь мощность излучения зависит от материала излучающего объекта и от состояния его поверхности. Так, для полированной меди коэффициент теплового излучения – 0.03, для вольфрама – 0.6, для окисленного железа – (0.6 – 0.9), для силикатных огнеупоров 0.9.

Принцип действия яркостного пирометра представлен на рис. 57, б. В фокусе линзы находится образцовая нить, которая нагревается от источника тока, проходящего через регулировочное сопротивление  $R_{\text{рег}}$ . Оператор регулирует этим сопротивлением ток до тех пор, пока нить не окажется неразличимой на фоне изображения излучающего тела. Сила тока измеряется и по полученному значению судят о температуре объекта с учетом его материала и качества поверхности. Пределы измерения таких пирометров – от 300 до 6000 °С.

В настоящее время для бесконтактного измерения температуры применяются методы тепловидения. В тепловизионных пирометрах в фокусе приемной линзы находится матрица, составленная из теплочувствительных элементов, выходные сигналы которых сканируются и передаются для дальнейшей обработки в микропроцессор или компьютер. Разрешающая способность таких пирометров достигает 0.1 °С.

Недостатком всех бесконтактных пирометров является сильная зависимость результатов измерений от коэффициента теплового излучения объекта, значение которого известно с ограниченной точностью. Достоинство бесконтактных пирометров – отсутствие непосредственного взаимодействия с объектом, вследствие чего тепловое поле объекта при измерении температуры не искажается. Кроме того, с помощью подобных пирометров удастся измерить, правда, с невысокой точностью температуру таких труднодоступных объектов, как планеты Солнечной системы или даже звезды.

#### 8.1.4.2. Термоанемометры

Термоанемометры служат для измерения скорости и объемного расхода негорючих газов и жидкостей. Метод основан на сносе тепла от нагретого предмета (терморезистора) движущимся потоком. Уравнение теплового баланса терморезистора, находящегося в движущейся среде, имеет вид:

$$I^2 R = \xi S (T_p - T_c),$$

где  $I$  – сила тока через терморезистор,  $R$  – его сопротивление,  $S$  – площадь поверхности терморезистора,  $T_p$  и  $T_c$  – температура терморезистора и температура среды соответственно,  $\xi$  – коэффициент теплоотдачи, зависящий от формы терморезистора, вязкости, скорости и теплопроводности среды.

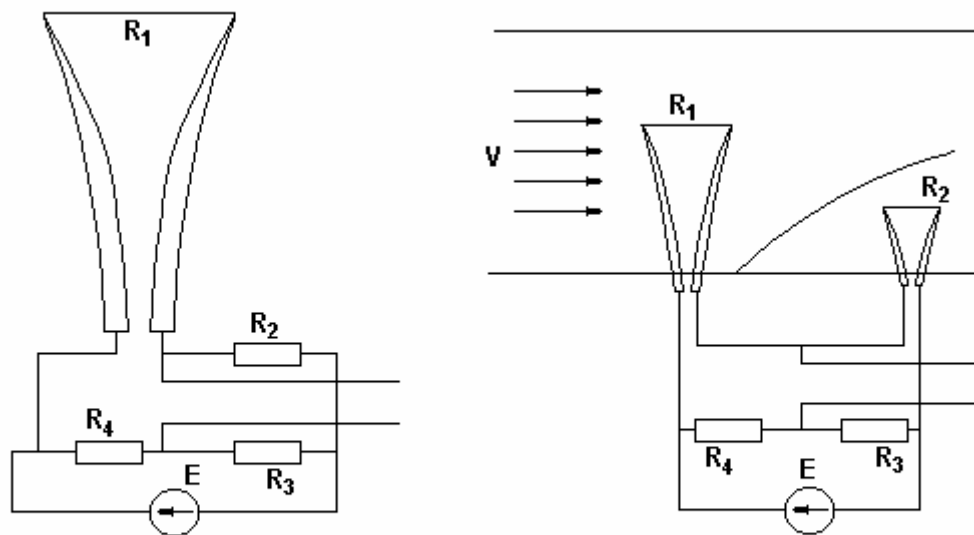


Рис. 58. Термоанемометр и его применение

В качестве терморезисторов для термоанемометров применяют проволочные терморезисторы из платиновой и вольфрамовой проволоки диаметром 5 – 20 мкм, а также пленочные терморезисторы из никеля и других материалов. Длина терморезистора от 5 до 10 мм. Терморезистор устанавливается в держатель, как показано на рис. 58, и включается в мост. Терморезистор нагревается проходящим через него током, а мост при этом уравнивается при неподвижной среде. При движении среды терморезистор охлаждается, в измерительной диагонали моста появляется напряжение, измеряемое любым методом. Для коррекции зависимости сопротивления терморезистора от температуры движущейся среды методами, известными из гидродинамики, из потока отделяют некоторую неподвижную его часть и помещают туда аналогичный терморезистор, включая его в противоположное плечо моста.

Диапазон измеряемых скоростей – от 0.01 до 500.00 м/с. Частотный диапазон термоанемометров – от 0 Гц до 500 Гц, поэтому подобные анемометры позволяют измерять высокочастотные флуктуации потоков. Основной причиной погрешности термоанемометров является зависимость сопротивления от теплофизических параметров среды. Кроме того с помощью термоанемометра измеряется скорость движения в локальной области потока, и эта скорость отличается от средней скорости, особенно если поток не ламинарный.

## 8.2. Измерение деформаций

Для измерения деформации используются *тензорезисторы*, то есть такие резисторы, сопротивление которых изменяется при их линейной деформации. Существует три вида тензорезисторов: проволочные, фольговые и полупроводниковые. Механизм возникновения тензочувствительности у проволочных и фольговых тензорезисторов имеет одинаковую природу.

Сопротивление электрического проводника длиной  $l$  с площадью поперечного сечения  $S$  есть

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

При увеличении длины проволоки в пределах ее упругой деформации на  $\Delta l$  ее диаметр уменьшается на  $\Delta d$ , причем относительные величины  $\Delta l/l$  и  $\Delta d/d$  связаны прямо пропорционально:  $\Delta d/d = -0.4 \Delta l/l$ . Кроме того, при деформации проводника изменяется его удельное сопротивление  $\rho$ . Для большинства проволочных и фольговых тензорезисторов относительное изменение удельного сопротивления незначительно.

Прологарифмируем теперь исходное выражение и вычислим его дифференциал, заменив бесконечно малые приращения на конечные. В результате получим выражение, связывающее относительные приращения:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \frac{\Delta d}{d}.$$

Удельная проводимость проволоки слабо зависит от деформации. Учитывая это, а также то, что два последних слагаемых в правой части ли-

нейно зависят от относительной деформации  $\varepsilon = \Delta l / l$ , получим, что относительное изменение сопротивления тензорезистора пропорционально его деформации:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot 0,4 \frac{\Delta l}{l} = K_T \frac{\Delta l}{l} = K_T \varepsilon,$$

где  $K_T$  – коэффициент тензочувствительности. Из полученной формулы следует, что его значение равно 1.8, однако из-за незначительного влияния первого слагаемого (относительного изменения удельного сопротивления) фак-

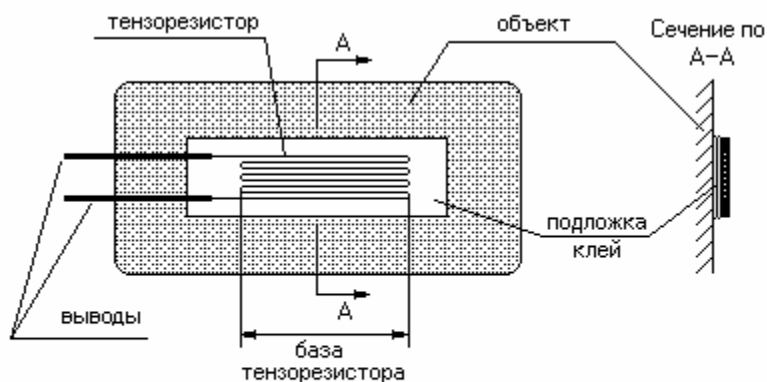


Рис. 59. Конструкция тензорезистора и его крепление на объекте

тическое значение коэффициента тензочувствительности применяемых материалов лежит в пределах  $1.8 \leq K_T \leq 3$ , поскольку у них различаются зависимости удельного сопротивления от деформации.

Проволочные тензорезисторы изготавливаются из тонкой проволоки толщиной 10 – 20 мкм и наклеиваются на тонкую бумажную подложку (рис. 59). К объекту тензорезистор на подложке приклеивается высококачественным неэластичным клеем с тем, чтобы деформация объекта передавалась на тензорезистор полностью. Ориентируется тензорезистор строго по тому направлению, в котором необходимо измерить деформацию. База тензорезистора может иметь размеры от 5 мм до 20 мм. Сопротивление недеформированного тензорезистора от 40 Ом до 800 Ом. Свойства материалов, из которых делаются проволочные тензорезисторы, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Характеристики некоторых материалов тензорезисторов**

Материал	Коэффициент тензочувстви-	Температурный Диапазон,	Критическая Температура,



	тельность	°С	°С
Константан (45 % Ni+55 % Cu)	2,0	-270...+260	315
Манганин	2,0	-270...+180	180
Нихром (80 % Ni+20 % Cr)	2,0	до 400	450
Платина-вольфрам	2,7 – 3,3	до 550	-

Фольговые тензорезисторы изготавливаются из фольги, прокатанной из тех же материалов и обладают такими же характеристиками. Они изготавливаются фотоспособом. На фольгу наносится фоточувствительный слой, на этот слой проектируется изображение тензорезистора, затем незащищенные участки вытравляются. В результате конфигурация фольговых тензорезисторов может быть достаточно сложной, а их база – довольно мелкой: до 1.0 мм.

Так же как и проволочные тензорезисторы, фольговые устанавливаются на объект с помощью клея. В тех случаях, когда необходимо измерять деформацию объектов при высоких температурах, тензорезисторы к ним привариваются.

Пределы измерения относительных деформаций с помощью проволочных и фольговых тензорезисторов сверху ограничиваются пределами упругих деформаций металлов, то есть 1 %. При коэффициенте тензочувствительности  $K_T = 2,0$  и начальном сопротивлении недеформированного тензорезистора, равном 100 Ом предел изменения сопротивления при полной деформации составит всего 2 Ома, и каждое значение этого изменения необходимо измерять с относительной погрешностью 1–2 %, что в абсолютном выражении составит 0,02 – 0,04 Ом. По отношению к полному сопротивлению тензорезистора погрешность измерения сопротивления окажется в пределах 0,02 – 0,04 %.

В связи с этим остро встает вопрос о точном определении коэффициента тензочувствительности и собственного сопротивления тензорезистора при его выпуске из производства. И если точное измерение сопротивления труда не составляет, то для точного измерения коэффициента тензочувствительности необходимо приклеить тензорезистор к образцовому объекту (например, к образцовой балке) так же хорошо, как и затем к объекту. Поэтому испытанный объект к дальнейшему применению пригоден не будет.

Указанная причина заставляет выполнять метрологические испытания тензорезисторов выборочно на отдельных представителях партии тензорезисторов, изготовленных при одинаковых технологических условиях. Это единственное средство измерений, которое подвергается выборочным метрологическим испытаниям с разрушением.

Понятно, что по результатам таких выборочных испытаний необходимо приписать всем тензорезисторам партии полученное значение коэффициента  $K_T$  и характеристики разброса значений индивидуальных коэффициентов внутри партии. Эта операция выполняется статистическими методами, описанными в лабораторном практикуме.

Указанный разброс коэффициента тензочувствительности проволочных и фольговых тензорезисторов является одной из причин погрешности измерения деформации.

Одного тензорезистора для измерения деформации объекта явно недостаточно. Необходимо преобразовать незначительное изменение его сопротивления, вызванное деформацией, в значимый сигнал напряжения или тока, который был бы пропорционален измеряемой величине и при отсутствии деформации также был бы равен нулю. Для этого применяются мостовые схемы, которые уравниваются при отсутствии деформации.

В зависимости от доступности поверхностей объекта схемы включения тензорезисторов называются "четверть моста" (рис. 60, а), "половина моста" (рис. 60, б) и "целый мост" (рис. 60, в). Эти схемы представлены на рис. 60 а, 60 б, 60 в соответственно. На этих схемах принято, что сопротивления всех плеч моста, в том числе сопротивления недеформированных тензорезисторов равны  $R$ . Напряжение питания моста  $E_0$ . Выходное напряжение, вызванное деформацией тензорезисторов, возникает в измерительной диагонали и обозначено через  $U_D$ .

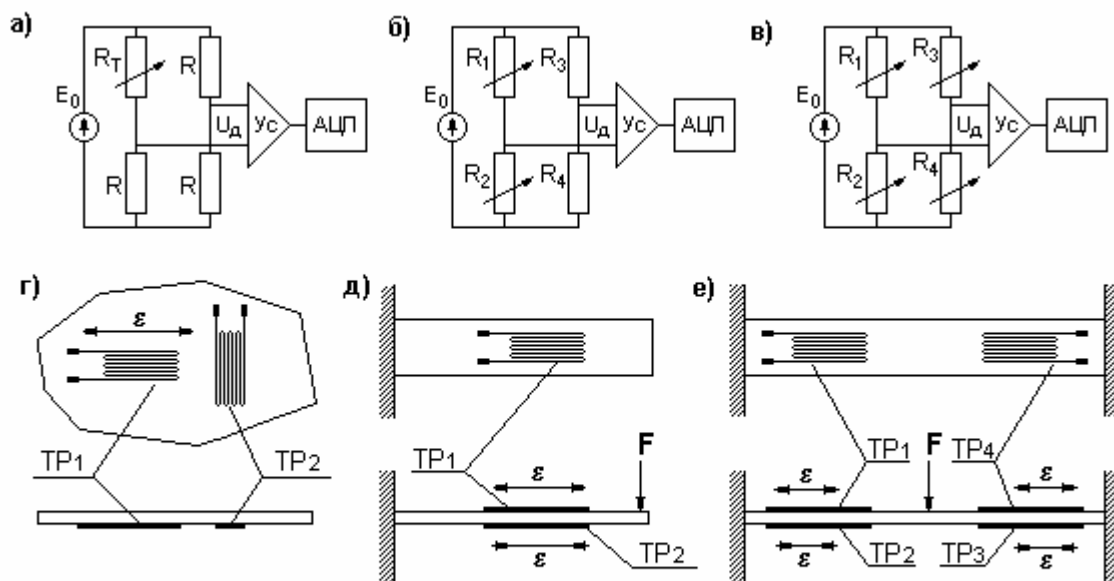


Рис. 60. Схемы включения тензорезисторов

Схема "четверть моста" применяется в тех случаях, когда доступной является только одна сторона объекта, например, внешняя поверхность крыла самолета при его испытаниях на прочность, внутренняя поверхность корпуса судна, наружная поверхность котла.

Тогда в заданное место на поверхность объекта наклеивается только один тензорезистор  $TP_1$  (рис. 60, г), сопротивление которого при показанной относительной деформации  $\varepsilon$  увеличивается, то есть  $R_T = R + \Delta R = R(1 + K_T \varepsilon)$ . Считая входное сопротивление усилителя  $R_{вх} \gg R$ , получим выражение для напряжения в диагонали данного неравновесного моста, вызванное деформацией:

$$U_D = \frac{E_0}{2} - E_0 \frac{R}{R + R_T} = E_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2 + K_T \varepsilon} \right) = E_0 \frac{K_T}{4} \frac{\varepsilon}{\left( 1 + K_T \frac{\varepsilon}{4} \right)}$$

Мы видим, что выходное напряжение неравновесного моста зависит от напряжения питания и что зависимость выходного сигнала от относительной деформации нелинейна. При  $K_T = 2.0$  и при максимальной относительной деформации  $\varepsilon_{\max} = 1\%$  погрешность от нелинейности составит  $0.5\%$ .

В тех случаях, когда объект деформируется строго в одном направлении, для компенсации погрешности от температуры перпендикулярно к тензорезистору  $TR_1$  наклеивают компенсирующий тензорезистор  $TR_2$ , как это показано на рис. 60, г. Этот тензорезистор включают в мост по схеме "половина моста", показанной на рис. 60, б, но поскольку он практически не воспринимает деформацию объекта, выражение для выходного напряжения остается прежним, действительным для схемы "четверть моста".

Если объект подвергается изгибу и обе его поверхности доступны, то тензорезисторы приклеивают на обе противоположные поверхности так, чтобы тензорезисторы испытывали деформации, равные по значению, но противоположные по направлению (рис. 60, д). Тогда при относительной деформации  $\varepsilon$ , вызванной силой  $F$ , сопротивление тензорезистора  $TR_1$  будет увеличиваться  $R_1 = R(1 + K_T\varepsilon)$ , а сопротивление тензорезистора  $TR_2$  будет уменьшаться  $R_2 = R(1 - K_T\varepsilon)$ . Тогда зависимость выходного напряжения моста от деформации будет линейной, а чувствительность схемы к деформации повысится в два раза:

$$U_D = \frac{E_0}{2} - E_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = E_0 \left( \frac{1}{2} - \frac{R(1 - K_T\varepsilon)}{2R} \right) = \frac{E_0 K_T}{2} \varepsilon.$$

Еще большего повышения чувствительности можно добиться, если объект позволяет использовать тензорезисторы во всех четырех плечах моста (рис. 60 в и 60 е):

$$U_D = E_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4} - E_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = E_0 \left( \frac{R(1 + K_T\varepsilon)}{2R} - \frac{R(1 - K_T\varepsilon)}{2R} \right) = E_0 K_T \varepsilon.$$

При использовании проволочных или фольговых тензорезисторов для измерения деформаций объектов возникают погрешности, обусловленные следующими причинами:

- разбросом коэффициентов тензочувствительности тензорезисторов,
- нагреванием тензорезисторов протекающим через них током,
- различием коэффициентов теплового расширения материалов тензорезистора и объекта, из-за чего тензорезистор испытывает деформацию даже при недеформированном объекте,
- термоэдс, возникающая в месте соединения проволоки тензорезистора с подводными медными проводами,

эластичностью клея,  
неверной ориентацией тензорезистора по направлению деформации,  
нестабильностью напряжения питания моста,  
дрейфом нуля усилителя постоянного тока и его тепловыми шумами.  
Действие некоторых из перечисленных причин удастся уменьшить.

Коррекция температурных погрешностей рассмотрена ранее. Эта коррекция достигается приклеиванием на объект дополнительного тензорезистора перпендикулярно основному. Погрешности от нагревания собственным током можно уменьшить, снижая силу этого тока, но при этом уменьшается чувствительность моста. Компромисс здесь достигается при импульсном питании моста. Моменты измерения выходного напряжения моста синхронизируются с моментами подачи импульсов питания. За счет этого увеличивают амплитудное значение напряжения питания и тем самым увеличивается чувствительность, но при этом уменьшается действующее значение этого напряжения, и тензорезисторы нагреваются гораздо меньше. В то же время при таком питании для усиления напряжения в измерительной диагонали моста применяется усилитель переменного напряжения, у которого дрейф отсутствует. Если к тому же на вход усилителя поставить фильтр, не пропускающий напряжение на частотах ниже частоты питания моста, то таким образом могут быть отфильтрованы помехи. Частота питающих импульсов выбирается в пределах 10 – 30 кГц.

### ***Полупроводниковые тензорезисторы (пьезорезисторы).***

Тензоэффект в полупроводниковых тензорезисторах возникает за счет того, что при их деформации изменяется удельное сопротивление  $\rho$ , коэффициент тензочувствительности при этом достигает 80. Но при этом предел допускаемых упругих деформаций полупроводникового тензорезистора ограничен значением 0.1 %, что в десять раз меньше, чем у проволочных или фольговых тензорезисторов. В связи с этим, а также из-за трудностей установки полупроводниковых тензорезисторов на объект для измерения собственно деформаций они не используются. Полупроводниковые тензорезисторы применяются только в составе датчиков других физических величин, таких как сила, давление, ускорение. Они изготавливаются

по полупроводниковой технологии, имеют очень малые размеры, большое сопротивление, сложную конфигурацию и изготавливаются либо на эластичной подложке, либо их подложка является упругим элементом датчика. В силу своих малых размеров и расширения области применения полупроводниковые тензорезисторы являются конкурентами пьезодатчикам и поэтому называются *пьезорезисторами*.

Технология изготовления полупроводниковых тензорезисторов, которые являются единым целым с подложкой, обеспечивает либо коррекцию, либо полное отсутствие некоторых погрешностей, таких как погрешность от неверной ориентации, погрешность от различия коэффициентов теплового расширения материала подложки и тензорезистора, погрешность от некачественного приклеивания. Кроме того, поскольку эти тензорезисторы входят в состав датчиков, оснащенных средствами индивидуальной регулировки, они подвергаются не выборочным, а сплошным метрологическим испытаниям в составе датчиков. В результате резко уменьшается погрешность от разброса значений коэффициентов тензочувствительности. Единственным недостатком полупроводниковых тензорезисторов является их невысокая термостойкость, что не позволяет использовать их при температурах выше 100 – 200 °С.

### 8.3. Тензорезистивные датчики

Датчики физических величин, чувствительный элемент которых основан на применении тензорезисторов, называются *тензорезистивными датчиками*.

**Датчики силы.** При измерении силы с помощью тензорезистивных датчиков выполняется цепочка взаимно однозначных преобразований, показанная на рис. 61. Применение полупроводниковой микротехнологии позволяет в корпусе датчика разместить измерительный мост, а в некоторых случаях усилитель и даже АЦП.

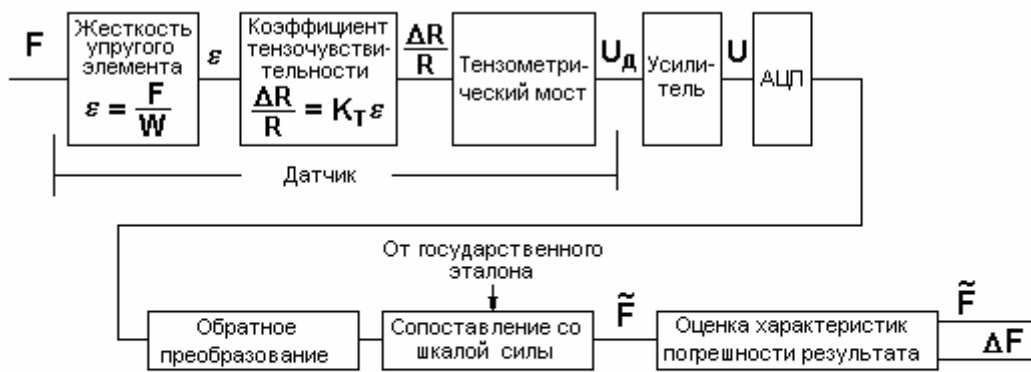


Рис. 61. Измерительные преобразования при измерении силы с помощью тензорезистивного датчика

На основе тензорезисторов создаются датчики силы с пределами измерений от долей грамма до десятков тонн. Пределы измерений определяются жесткостью  $W$  упругого элемента, который преобразует измеряемую силу в деформацию этого элемента. Деформация преобразуется в изменение сопротивления тензорезистора, наклеенного на упругий элемент. В измерительной диагонали тензометрического моста, содержащего тензорезистор, появляется напряжение, пропорциональное деформации, которое усиливается и поступает на вход АЦП. Выходной код АЦП вводится в компьютер, где выполняются последующие операции.

На рис. 62 представлены два примера датчиков силы, в которых используются не рассмотренные ранее комбинации упругих элементов с тензорезисторами. В любом датчике силы на конструктивном элементе, воспринимающем силу, должна быть предусмотрена выпуклость, которая фиксирует точку приложения силы. В датчиках, предназначенных для применения в весоизмерительных системах, важно обеспечить независимость результата измерения от расположения взвешиваемого изделия (продукта) на платформе, где это изделие размещается. Указанная независимость может достигаться иными методами: установкой под платформой нескольких датчиков и последующей математической обработкой результатов.

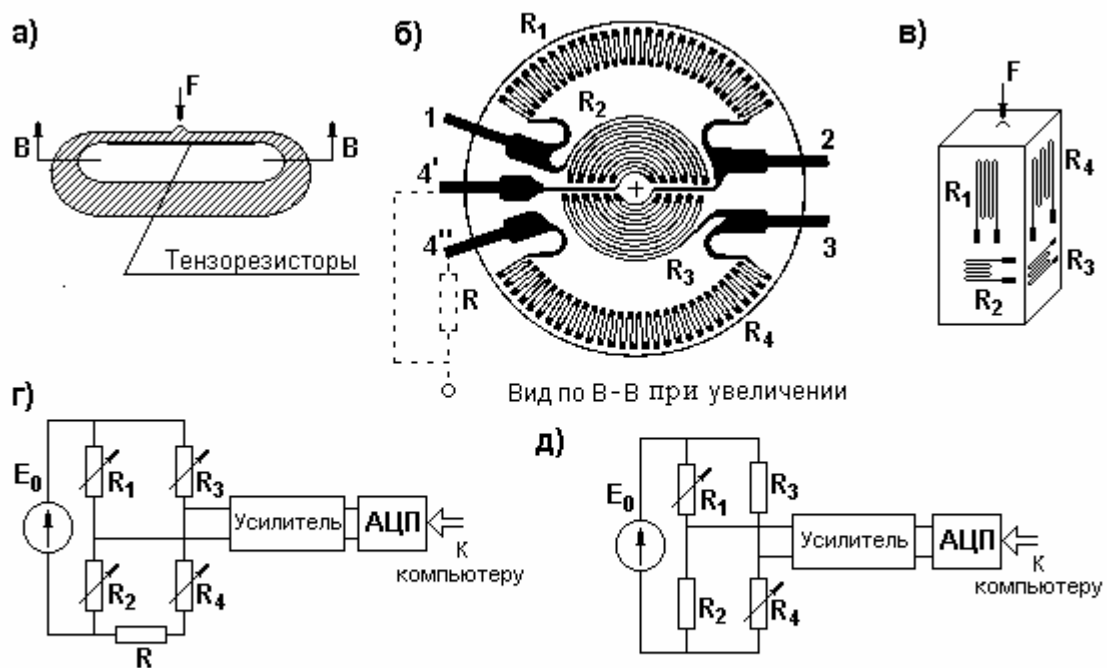


Рис. 62. Примеры тензорезистивных датчиков силы

В первом примере (рис. 62, а) показан в разрезе круглый датчик. Его упругим элементом является верхняя мембрана, на которой с внутренней стороны наклеен фольговый или полупроводниковый тензорезистивный элемент, показанный на рис. 62 б. Этот элемент представляет собой полный мост с возможностью подключения к нему внешнего сопротивления  $R$ , предназначенного для уравнивания моста при отсутствии деформации. При воздействии на датчик силы  $F$  тензорезисторы  $R_1$  и  $R_4$  сжимаются, а тензорезисторы  $R_2$  и  $R_3$  растягиваются. Эти тензорезисторы включаются в мост так, как показано на рис. 60, в и 62, г. Относительная деформация  $\varepsilon$  преобразуется в напряжение измерительной диагонали моста по формуле

$$U_{\text{д}} = E_0 K_{\text{T}} \varepsilon.$$

Полупроводниковые мембраны подобной конструкции изготавливаются в одном кристалле на подложке толщиной несколько микрон и диаметром до 1 см.

Вторая конструкция упругого элемента (рис. 62, в) требует иной схемы включения тензорезисторов в мост. Этот упругий элемент под действи-



ем измеряемой силы претерпевает только сжатие. В направлении деформации сжатия на упругом элементе установлены тензорезисторы  $R_1$  и  $R_4$ , которые включены в мост, как показано на рис. 62, д. Тензорезисторы  $R_2$  и  $R_3$  установлены перпендикулярно основным тензорезисторам и применяются для коррекции температурных погрешностей, как это было указано ранее, в разд. 7.2. Положим, что в отсутствие воздействия измеряемой силы сопротивления всех тензорезисторов равны, а входное сопротивление усилителя значительно больше этих сопротивлений. Тогда напряжение в измерительной диагонали такого моста есть

$$U_{\text{Д}} = E_0 \left( \frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = E_0 \left( \frac{R}{R + R(1 - K_T \varepsilon)} - \frac{R(1 - K_T \varepsilon)}{R + R(1 - K_T \varepsilon)} \right) = \frac{E_0 K_T}{2} \frac{\varepsilon}{1 - K_T \frac{\varepsilon}{2}}.$$

В случае, когда применяемые тензорезисторы фольговые и  $K_T = 2.0$ , нелинейность преобразования составит не более 1 %. При использовании в таких датчиках полупроводниковых тензорезисторов, для которых  $\varepsilon_{\text{max}} = 0.1\%$ , нелинейность преобразования составит всего 0.1 %.

Наиболее точным средством измерения силы, построенным на основе тензорезистивных датчиков, являются электронные весы фирмы "Сарториус" со встроенным микропроцессором. В этих весах тензорезисторы используются в качестве первого звена цепи отрицательной обратной связи, с помощью которой взвешиваемый груз компенсируется силой, создаваемой магнитоэлектрическим устройством. Погрешность весов не превышает 0.001 %. При метрологических испытаниях и применении весов в микропроцессор вводится значение плотности окружающего воздуха в целях исключения погрешности, вызываемой силой выталкивания взвешиваемого предмета воздухом в соответствии с известным законом Архимеда. Среди весов, выпускаемых фирмой "Сарториус", отметим весы SC2 (предел измерения 2.1 г, разрешающая способность 0.1 мкг) и весы MC5 (предел измерения 5.1 г, разрешающая способность 1 мкг).

Среди изготовителей датчиков силы отметим германскую фирму "Messtechnik", которая выпускает датчики силы с пределами измерения от 5 до 50, от 50 до 1000, от 100 до 10000 и от 5000 до 500000. Погрешность датчиков – от 0.02 % до 0.03 %. Та же фирма выпускает датчики силы для

взвешивания цистерн, бункеров и тому подобного с верхним пределом измерения до 5000000 Н.

**Датчики ускорения.** В этих датчиках измеряемое ускорение преобразуется в силу за счет использования силы инерции, действующей на тело с точно известной массой  $m$ :  $F = m \ddot{x}$ , где  $\ddot{x}$  - ускорение датчика. Цепочка измерительных преобразований, выполняемых с участием тензорезистивных датчиков, представлена на рис. 63.



Рис. 63. Измерительные преобразования при измерении ускорения с помощью тензорезистивного датчика

Некоторые из возможных вариантов установки на упругий элемент тела с массой  $m$  и размещения на нем тензорезисторов показаны на рис. 64. Наибольшей чувствительностью из приведенных вариантов будет обладать датчик, у которого тело с массой  $m$  прикреплено на конце упругого элемента в виде консольной балки. Рабочие тензорезисторы обозначены здесь, как  $R_1, R_2$ , а тензорезисторы  $R_3, R_4$  установлены для компенсации температурных погрешностей, и их сопротивление не зависит от ускорения. Схема включения тензорезисторов в мост по схеме рис. 60, б, формула для напряжения в диагонали – для схемы "половина моста".

Менее чувствительным будет датчик ускорения, у которого тело массы  $m$  и тензорезисторы установлены на гибкий элемент в соответствии с рис. 64, б. Тензорезисторы включаются в схему "целого моста" в соответствии с рис. 64, в. И наконец, наименьшей чувствительностью будет обладать датчик ускорения, гибкий элемент которого работает на сжатие и рас-

тяжение (рис. 64, г). Тензорезисторы такого датчика включаются по схеме, представленной на рис. 62 г.

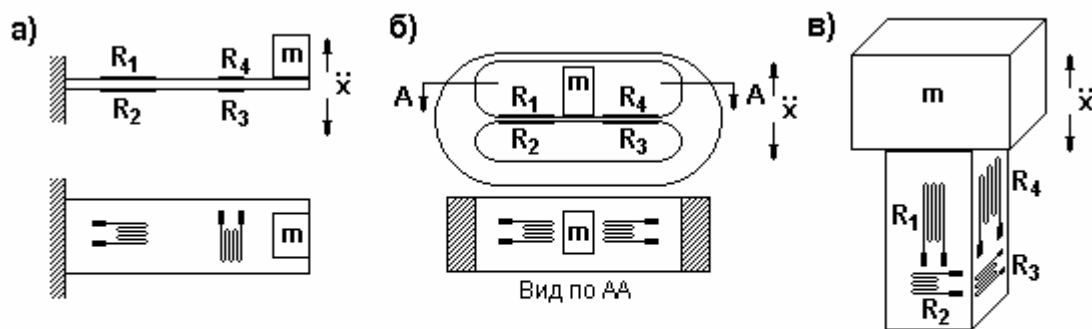


Рис. 64. Примеры взаимного расположения основных элементов тензорезистивных датчиков ускорения

Повышения чувствительности тензорезистивных датчиков ускорения можно добиться, используя импульсное питание моста, синхронизированное с моментами измерения (см. также раздел 7.2).

В датчиках ускорения значения массы и жесткости упругого элемента подбирают в соответствии с требуемой чувствительностью. Если необходимо построить датчик виброускорений или если датчик ускорений должен работать в заданной области частот, то масса и жесткость упругого элемента должны обеспечивать такую частоту собственных свободных колебаний, чтобы она была существенно выше верхней границы частотного спектра измеряемых ускорений. Выполнение этого условия позволит обеспечить равномерную амплитудно-частотную характеристику датчика во всей заданной области частот.

Широкую номенклатуру датчиков ускорения выпускает фирма “Burster” (Германия). Для их создания использованы полупроводниковые тензорезисторы, которые иногда называются *пьезорезисторами*. Датчики отличаются диапазонами измерения, характеристиками погрешности, габаритами и присоединительными размерами. Предел допускаемой погрешности не превышает 1 %. Масса датчиков – менее 3 г, габаритные размеры – менее 10×10×10 мм.

Для метрологических испытаний датчиков вибрационного ускорения применяются вибростенды, которые воспроизводят гармонические вибрации с регулируемой частотой и амплитудой.

Государственный эталон постоянного ускорения реализуется на центрифуге, скорость вращения которой и расстояние от центра вращения до датчика известны с высокой точностью. На чувствительный элемент датчика в этом случае действует постоянное центробежное ускорение. В качестве государственного эталона переменных ускорений используется двойная центрифуга.

**Датчики давления.** В тензорезистивных датчиках давления жидкости или газа измеряемое давление преобразуется в силу с помощью поршня или мембраны, площадь которых известна с высокой точностью. Цепочка измерительных преобразований, выполняемых при измерениях давления с участием тензорезистивных датчиков, показана на рис. 65.



Рис. 65. Измерительные преобразования при измерении давления с помощью тензорезистивного датчика

Датчики давления подразделяются на датчики абсолютного давления, датчики избыточного давления (по сравнению с атмосферным) и датчики разности давлений. Внутренняя камера этих датчиков герметично делится упругой или мягкой мембраной на две полости, как показано на рис. 66.

В полости 2 датчика абсолютного давления (рис. 66, а) создается вакуум. На этом рисунке представлен вариант, когда упругим элементом является мембрана, на которой с помощью полупроводниковой технологии сформированы тензорезисторы в соответствии с рис. 66, а. Эти тензорези-

сторы расположены на той стороне мембраны, которая находится в полости 2 и не подвергается воздействию среды, которая может быть агрессивной. Площадь и жесткость этой мембраны должны быть известны с высокой точностью, поскольку мембрана выполняет два вида преобразования: преобразование давления в силу через площадь мембраны и преобразование силы в деформацию тензорезисторов.

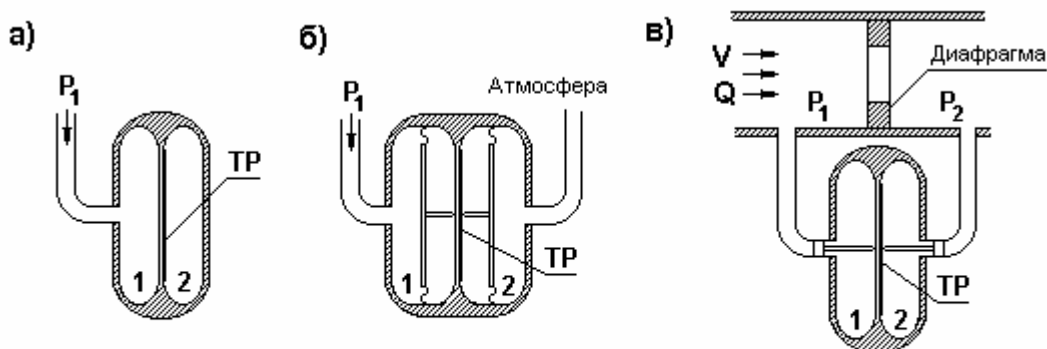


Рис. 66. Примеры схем тензорезистивных датчиков абсолютного давления а), избыточного давления б), и разности давлений в)

В датчике избыточного давления упругим элементом может служить такая же мембрана, тензорезисторы которой защищены от атмосферы лаковыми покрытиями. Но на рис. 66, б представлен вариант, когда от воздействия агрессивных компонент той и другой среды мембрана с тензорезисторами, обладающая известной жесткостью, защищена герметичными плоскими мембранами, жесткость которых равна нулю. Эти мембраны выполняют преобразование давления в силу, которая затем преобразуется упругой мембраной с тензорезисторами.

Еще один вариант защиты от агрессивных сред представлен на рис. 66, в. С помощью такого датчика измеряется разность давлений в потоке жидкости или газа на участке трубопровода, где находится диафрагма, сужающая поток. Разность давлений до и после диафрагмы возникает из-за сопротивления, которое оказывает диафрагма потоку, и эта разность пропорциональна квадрату скорости потока или расхода движущейся среды. Среда может быть агрессивной, и здесь защита от нее является обязательной. В качестве средства защиты на рис. 66, в представлены поршни, которые одновременно являются преобразователями давления в силу. Си-

ла, которую они воспринимают, передается на мембрану с помощью штоков.

Во всех трех случаях через ТР обозначены фольговые или полупроводниковые тензорезисторы, сформированные на мембранах в соответствии с рис. 62, в.

Тензорезистивные датчики давления всех трех видов находят широкое применение на таких объектах, как электростанции, котельные, испытательные стенды энергоагрегатов. Отечественной промышленностью выпускается широкая номенклатура тензорезистивных датчиков давления типов “САПФИР-22” и “МЕТРАН-22”. Диапазоны измеряемых давлений и разности давлений этих датчиков – от десятков килопаскалей до 400 МПа и выше. Погрешность датчиков 0.25 % и 0.5 %. В корпусе датчиков смонтированы тензомосты и вторичные преобразователи. Выходным сигналом этих датчиков является постоянный ток силой 0–5, 0–20 и 4–20 мА. Выходные сигналы зарубежных тензорезистивных датчиков давления промышленного применения изменяются в тех же пределах.

Погрешность лучших тензорезистивных датчиков давления фирм “Fluke” и “Motorola” (США), “Rosemount” и “Druck” (Германия), “Метран” (Россия, г. Челябинск), завода “Манометр” (Москва) и др. достигает 0.02 %. На основе подобных датчиков фирмы выпускают семейство калибраторов давления с той же погрешностью. В этих датчиках преобразование давления в силу и силы в деформацию осуществляется с помощью упругих элементов типа мембран (рис. 66, б). В датчиках применяются фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

Для метрологических испытаний промышленных датчиков давления используются высокоточные датчики или грузопоршневые манометры, образцовое давление в которых создается грузами точного веса.

#### **8.4. Пьезоэлектрические датчики**

Пьезоэлектрические датчики относятся к генераторным датчикам. В них используется *пьезоэлектрический эффект* (или, короче, *пьезоэффект*), который заключается в том, что некоторые материалы под действием на них силы электризуются: на их поверхности появляется электриче-

ский заряд, значение которого зависит от приложенной силы. Это означает, что материал, обладающий пьезоэффектом, выполняет преобразование силы в электрический заряд. Природным материалом, который обладает пьезоэффектом, является кварц или горный хрусталь.

Заряд, возникающий вследствие пьезоэффекта, линейно зависит от приложенной силы  $F$ :

$$q = K_{\Pi} F ,$$

где  $K_{\Pi}$  - коэффициент пьезочувствительности материала.

Точность преобразования силы в заряд довольно высока. Так, кристалл кварца выполняет это преобразование с относительной погрешностью  $10^{-4} - 10^{-6}$ . Дальнейшее преобразование электрического заряда в напряжение выполняет усилитель заряда, и полученное напряжение может быть измерено любым средством измерения напряжения: аналоговым или цифровым вольтметром или АЦП, сопряженным с компьютером.

Пьезоэффект может быть *продольным*, когда заряд возникает на поверхностях, к которым приложена сила, или *поперечным*, когда заряд возникает на боковых поверхностях. При этом материал практически не деформируется.

Рассмотрим схемы, иллюстрирующие продольный (рис. 67, а) и поперечный (рис. 67, б) пьезоэффекты. Для эффективного использования поперечного пьезоэффекта две пластины пьезоматериалов соединяют параллельно, прокладывают между ними проводящую прокладку и закрепляют их, как консольную балку. Образующийся заряд возникает на зажимах, как показано на рисунке. При действии силы  $F$  верхняя пластина растягивается, а нижняя сжимается, и заряд возникает на боковых относительно действующих напряжений сторонах пластин. В такой конструкции чувствительность преобразования  $F \rightarrow q$  существенно выше.

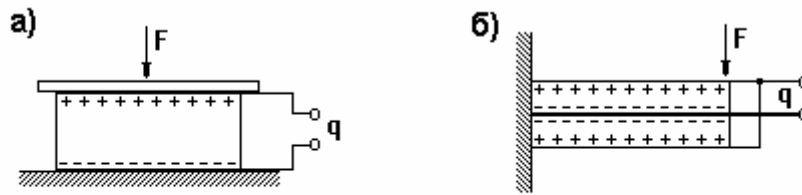


Рис. 67. Продольный а) и поперечный б) пьезоэффекты

К достоинствам кристалла кварца применительно к созданию датчиков силы и других величин относится его стойкость к высокой температуре (пьезоэффект утрачивается после точки Кюри при  $t^{\circ} = 530^{\circ}\text{C}$ ), а также высокая точность и стабильность преобразования.

Затрудняет применение кварца трудоемкость обработки и очень высокое удельное сопротивление, достигающее  $10^{15} - 10^{16}$  Ом·м. Поверхностное сопротивление кварца гораздо меньше, поэтому для предотвращения утечки заряда приходится применять хорошую изоляцию, а также тщательно обрабатывать поверхности и герметизировать датчики, защищая кристалл кварца от пыли и грязи. Высокие требования предъявляются к кабелю, соединяющему пластины кварца со входом усилителя заряда. Во избежание утечек заряда изоляция между проводами должна быть очень высокой, а емкость между ними минимальной.

Кроме кристалла кварца в пьезоэлектрических датчиках используются пьезокерамики. К пьезокерамикам относится титанат бария, различные разновидности цирконато-титаната свинца (ЦТС) и другие. Точность преобразования силы в заряд у этих материалов хуже, чем у кварца.

Пьезокерамики изготавливаются из сегнетоэлектриков, которые не являются кристаллическими веществами и их домены расположены хаотично. Сегнетоэлектрики сильно измельчают, а затем спекают с вязущим веществом в сильном электростатическом поле. Сравнительные характеристики пьезоэлектрических материалов приведены в таблице 5.

Таблица 5

**Сравнительные характеристики пьезоэлектрических материалов**

Материал	Коэффициент пьезочувствительности $K_{II}$	$\varepsilon$	Точка Кюри



	[Кл/Н]			°С
	продольной	поперечной		
Кристалл кварца	$2,31 \cdot 10^{-12}$	$2,31 \cdot 10^{-12}$	4,5	530
Титанат бария	$78 \cdot 10^{-12}$	$78 \cdot 10^{-12}$	1700	150
Цирконато-титанат свинца (ЦТС)	$(100 - 300)10^{-12}$	$(30 - 160)10^{-12}$	1300	до 400

Таким образом ясно, что на основе материалов, обладающих пьезоэффектом, могут быть созданы пьезоэлектрические датчики силы, ускорения и давления. От подобных тензорезистивных датчиков пьезоэлектрические отличаются повышенной температурной стойкостью и повышенной надежностью. Однако при невысоких температурах применения в связи с успехами в микротехнологии тензорезистивные датчики успешно конкурируют с пьезоэлектрическими.

Из-за высокой твердости пьезоэлектрических материалов они практически не деформируются под воздействием силы, и допустимое механическое напряжение, которое такие материалы могут выдержать без разрушения, составляет  $(80 - 90)10^6 \text{ Н/м}^2$ .

Заряд, возникающий при воздействии на пьезоэлемент силы, не может быть передан непосредственно для дальнейших преобразований, и его желательно усилить и преобразовать в напряжение. Применять для этого усилитель напряжения даже с очень большим входным сопротивлением нецелесообразно, поскольку его выходной сигнал будет зависеть от нестабильной емкости датчика и паразитных емкостей соединительных кабелей. Для того, чтобы эту зависимость исключить и преобразовать заряд пьезоэлемента в напряжения, применяют усилитель заряда.

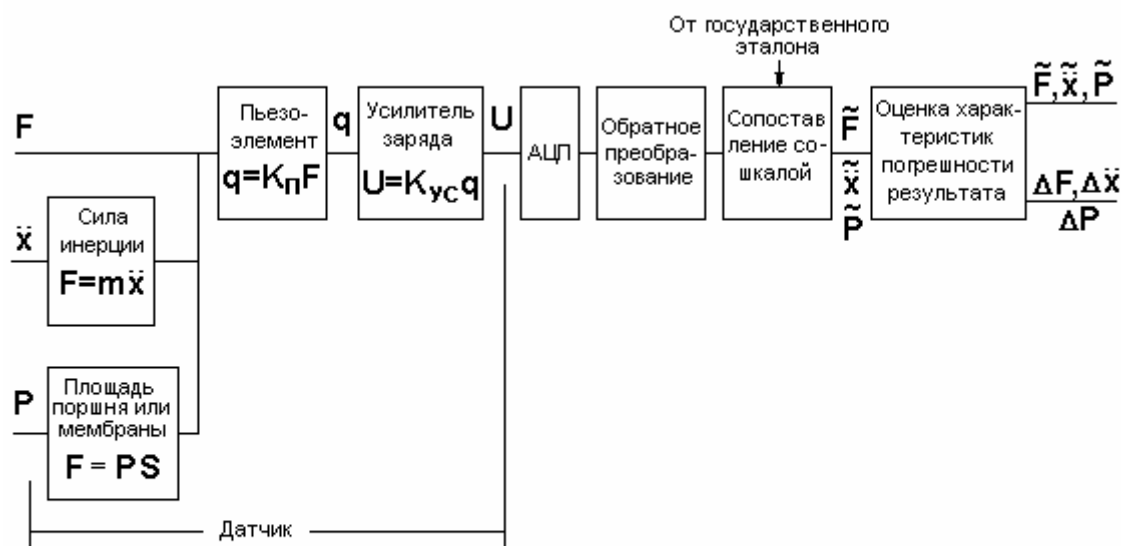


Рис. 68. Измерительные преобразования при измерении силы, ускорения и давления с помощью пьезоэлектрических датчиков

На рис. 68 представлены цепочки преобразований, которые выполняются с участием пьезоэлектрических датчиков.

В связи с миниатюризацией электронных схем усилитель заряда зачастую включается в состав пьезоэлектрического датчика. В результате входные цепи усилителя приближаются непосредственно к источнику заряда и тем самым уменьшаются погрешности, вызванные несовершенством изоляции кабеля, передающего заряд от пьезоэлемента к усилителю, и его емкостью, которая частично шунтирует пьезоэлемент датчика.

Усилитель заряда общий для всех типов пьезоэлектрических датчиков. Он представляет собой усилитель напряжения с большим коэффициентом усиления по-

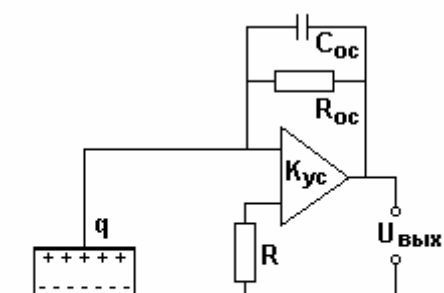


Рис. 69. Усилитель заряда

рядка  $10^5 - 10^6$ , охваченный глубокой отрицательной емкостной обратной связью. В связи с этим усилитель является, по сути, конденсатором, на вы-

ходе которого развивается напряжение  $U_{\text{вых}} \approx q / C_{\text{ос}}$ , где  $C_{\text{ос}} = (50 - 100)$  пФ – емкость конденсатора, стоящего в цепи обратной связи. Упрощенная схема такого усилителя представлена на рис. 69. Параллельно с конденсатором обратной связи включается активное сопротивление  $R_{\text{ос}} \approx 10^6 \div 10^7$  Ом. Современная элементная база позволяет достичь чувствительности усилителя заряда до 1 В/пКл.

Рассмотрим конструктивные особенности пьезоэлектрических датчиков.

Схемы воздействия силы на пьезоэлемент датчика представлены на рис. 70. Для того чтобы обеспечить наилучшую изоляцию, в датчике силы, работающем по принципу, показанному на рис. 70, а, используется изоляция, которая обеспечивается самим пьезоэлементом. Для этого применяется составной пьезоэлемент, состоящий из двух пластин, между которыми проложена проводящая прокладка (см. рис. 70, а). Используется продольный пьезоэффект, пластины пьезоэлементов 4 соединяются и располагаются так, чтобы заряды, возникающие под действием измеряемой силы, были направлены навстречу друг другу. Электрическое соединение пластин параллельное. Поскольку верхняя и нижняя пластины вынуждены контактировать корпусом датчика 1, отвод заряда с них осуществляется с помощью коаксиального кабеля, центральный провод 2 которого присоединен к внутренним сторонам пластин пьезоэлементов, а внешняя оболочка 3 соединяется с корпусом. Далее следует усилитель заряда и все последующие преобразователи. Точно так же обеспечивается наилучшая изоляция и в при использовании поперечного пьезоэффекта в соответствии с рис. 70, б. Подобная схема размещения пьезоэлементов представлена на рис. 70, г и является типичной также для датчиков давления. Для датчика ускорения, в котором тело 5 массой  $m$  не контактирует с корпусом, эта схема не используется.

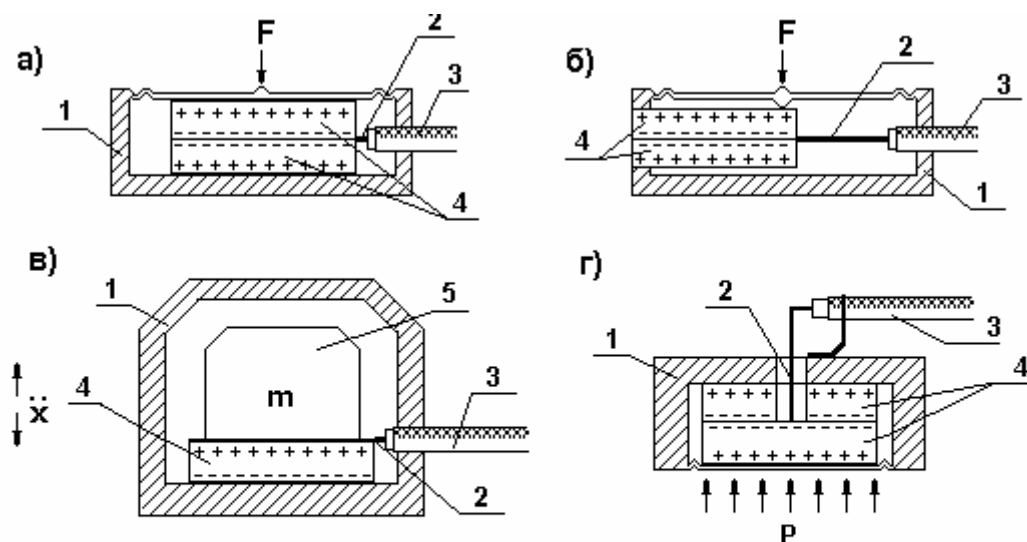


Рис. 70. Взаимное расположение элементов пьезоэлектрических датчиков силы а), и б), ускорения в) и давления г)

С развитием полупроводниковой микротехнологии тензорезистивные датчики давления и ускорения становятся все более серьезными конкурентами пьезоэлектрических датчиков тех же измеряемых величин. Единственной позицией, которую прочно занимают пьезоэлектрические датчики, является измерение очень высоких импульсных давлений при высоких температурах. Примером таких измерений могут служить измерения давления взрыва в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания – дизельных и бензиновых. В этой области наилучшими характеристиками обладают пьезоэлектрические датчики с водяным охлаждением фирмы "Kistler" (Германия). Точность датчиков фирмы "Kistler" составляет 0.2 % на пределах измерения до 20.0 МПа и более. Частотная полоса – до 80 кГц. Фирмой выпускаются одноосные, двухосные и трехосные пьезоэлектрические датчики ускорения. Высокочувствительные миниатюрные пьезоэлектрические датчики ускорения с выходным сигналом в виде заряда или напряжения с частотным диапазоном до 50 кГц производит также фирма Bruel & Kjaer (Дания). Масса датчиков – от 3 до 12 г. Пьезоэлектрические датчики для сейсмических измерений, в частности, в целях раннего прогнозирования землетрясений, выпускает фирма "PCB Piezotronics".

Погрешность лучших современных пьезоэлектрических датчиков ускорения достигает 0.2 – 0.5 %.

## 8.5. Потенциометрические датчики

Потенциометрические датчики не утратили своего значения до настоящего времени в силу своей простоты и высокой линейности. Датчики этого типа представляют собой сопротивление, изменяющееся под действием измеряемой величины – перемещения или угла поворота. В проводочных потенциометрических датчиках сопротивление образуется плотной однослойной обмоткой из калиброванной проволоки, которая изготавливается из нихрома или иного материала с высоким удельным сопротивлением. По обмотке перемещается скользящий или катящийся элемент (движок). Через резистор, образованный обмоткой, протекает стабильный ток  $I_0$  силой 1 мА или 10 мА. Падение напряжения, которое создается на участке сопротивления резистора между движком и общей точкой, пропорционально перемещению. Объект, положение или угол поворота которого требуется измерить, жестко связан с этим движком. В линейных датчиках это напряжение пропорционально измеряемой величине и является выходным сигналом датчика. Резистор может быть выполнен не только из калиброванной проволоки, но и из проводящего пластика. Устройство потенциометрических датчиков, преобразующих плоскопараллельное перемещение или угол поворота в изменение постоянного напряжения, представлено на рис. 71.

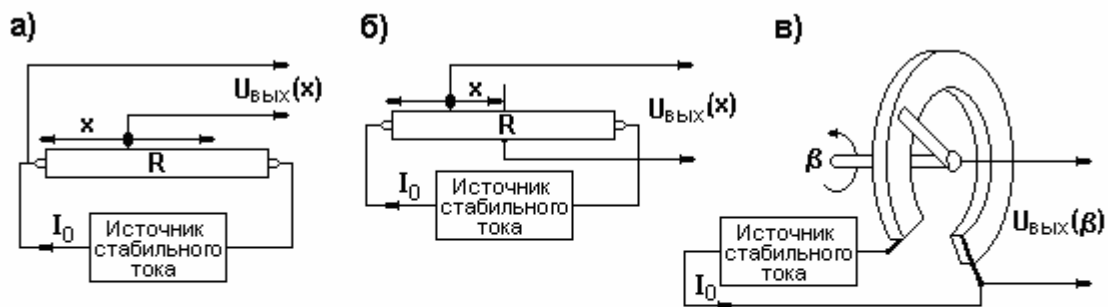


Рис. 71. Схемы потенциометрических датчиков перемещения и угла поворота

На рис. 71 а представлен датчик с однополярным выходным сигналом. Выходное напряжение датчика, представленного на рис. 71 б, изменяет полярность в зависимости от положения движка относительно середины ре-

198

зистора. Диапазон перемещений, преобразуемых потенциометрическими датчиками, довольно широк и составляет от 10 мм до 200 мм. Потенциометрические датчики угла поворота имеют диапазон входных углов: однооборотные, показанные на рис. 71 в, – до  $355^\circ$ , многооборотные – до  $7200^\circ$ . Многооборотные датчики имеют не круглый, а плоский резистор, как у датчиков перемещения. В этих датчиках преобразование угла поворота в перемещение выполняется винтовой парой.

Датчики с резистором из проводящего пластика обладают лучшей линейностью, чем проволочные. Кроме того, они устойчивее к износу пары движок – резистор. Все потенциометрические датчики чувствительны к вибрациям, тряске, ударам, из-за чего может пропадать контакт движка с резистором.

Проволочным потенциометрическим датчикам легко придается нелинейная функция преобразования заданного вида. С этой целью обмотка наматывается на каркас, толщина которого изменяется в соответствии с желаемой функцией.

Наилучшие показатели потенциометрических датчиков, достигнутые, в частности, фирмой "Мегатрон":

для проволочных датчиков линейного перемещения и угла поворота предел допускаемой погрешности от нелинейности составляет от 0.15 % до 5.0 %;

для датчиков, резистор которых выполнен из проводящего пластика, предел допускаемой погрешности от нелинейности от 0.01 % до 0.5 %, разрешающая способность датчиков перемещений не хуже 10 мкм, ресурс – 50 млн движений оси.

Широкую номенклатуру потенциометрических датчиков линейных и угловых перемещений выпускает фирма "Burster" (Германия). Пределы измерения линейных перемещений 0 – 100 мм при длине корпуса датчика 253 мм, нелинейность датчика не превышает 0.1 %, полное сопротивление 5 кОм. Диапазон измерения угловых перемещений 0 –  $350^\circ$ , погрешность не превышает 0.5 %, масса 90 г.

## **8.6. Емкостные датчики**

Емкостные датчики преобразуют измеряемую величину в изменение емкости конденсатора и являются параметрическими датчиками. Большинство емкостных датчиков представляют собой конденсатор с плоскопараллельными пластинами или коаксиальными цилиндрическими электродами. Емкость подобных датчиков

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (41)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость воздуха,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала между пластинами,  $S$  – площадь пластин (электродов),  $d$  – расстояние между пластинами (электродами).

Из формулы (41) следует, что емкостный датчик может выполнять преобразование путем воздействия измеряемой величины на значение диэлектрической проницаемости, на площади пластин (электродов) и на расстояние между ними.

Преобразование воздействием на диэлектрическую проницаемость выполняют такие емкостные датчики, как датчики уровня  $h_x$  негорючих жидкостей, датчики влажности сыпучих материалов, например, зерна, и датчики толщины  $\delta$  изоляционного материала, в том числе, изоляционных покрытий. Принцип действия этих датчиков поясняется рис. 72, а и 72, б.

Одна из конструкций датчика уровня и влажности зерна представляет собой цилиндрический конденсатор, электродами которого являются полый цилиндр и отделенный изолятором внутренний стержень длиной  $h$  (см. рис. 72, а). При погружении в жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  на глубину  $h_x$  емкость получившегося конденсатора будет линейно зависеть от  $h_x$ :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(d_1/d_2)} [h_x\varepsilon + (h - h_x)] = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(d_1/d_2)} [h + h_x(\varepsilon - 1)].$$

В подобных датчиках основная часть погрешности возникает из-за проводимости жидкости, вследствие чего при изменении уровня изменяются активные потери образованного таким образом конденсатора.

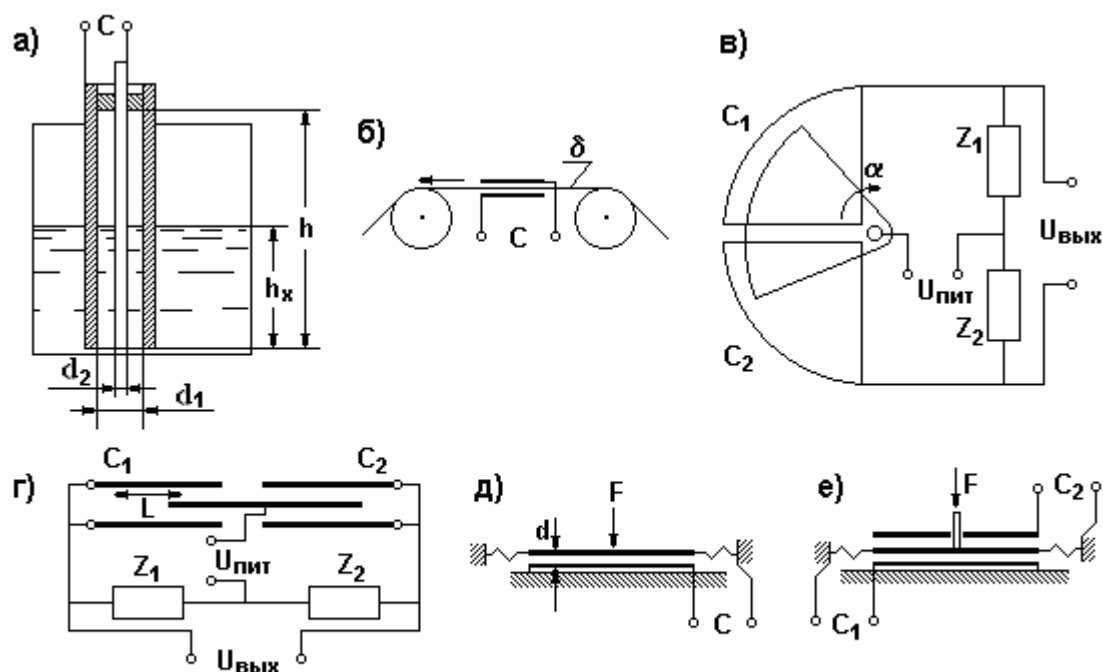


Рис. 72. Схемы емкостных датчиков

Принцип действия емкостного датчика измерения толщины ленты диэлектрического материала, в том числе бумаги, в процессе изготовления показан на рис. 72, б. Лента толщиной  $\delta$  при ее изготовлении проходит между параллельными обкладками плоского конденсатора, расположенными на расстоянии  $d$  друг от друга. Относительная диэлектрическая проницаемость ленты равна  $\epsilon$ , диэлектрическая проницаемость воздуха –  $\epsilon_0$ . Площадь обкладок конденсатора  $S$ . Тогда емкость конденсатора зависит от измеряемой толщины следующим образом:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{(d - \delta) + \delta / \epsilon} = \frac{\epsilon_0 S}{d - \delta(1 - 1/\epsilon)}.$$

Емкостные датчики с изменяющейся площадью  $S$  обкладок (электродов) применяются при измерении, например, угла поворота  $\alpha$  (рис 72, в) или перемещений  $L$  в несколько десятков миллиметров (рис. 72, г). Эти датчики удобно включить в мост переменного тока (см. рис. 72, д, е).

Широко применяются емкостные датчики для измерения влажности. В этих датчиках измеряемая величина – влажность влияет на диэлектрическую проницаемость воздуха или какого-либо сорбента, находящегося ме-



жду обкладками конденсатора. В частности, емкостные датчики влажности применяются для измерения влажности зерна в зернохранилищах. Эти объекты являются аварийноопасными, поскольку при излишне высокой влажности зерно склонно к самовозгоранию.

Наибольшее распространение получили емкостные датчики, в которых измеряемая величина преобразуется в малое перемещение обкладок конденсатора по направлению друг к другу. Такие датчики могут быть выполнены в двух вариантах (рис. 72, д и 72, е). Расстояние  $d$  между обкладками датчиков, выполненных в соответствии с обычной дискретной технологией, составляет от 10 мкм до нескольких десятых миллиметра. То же расстояние у емкостных датчиков, изготовленных способами полупроводниковых микротехнологий, может быть уменьшено до сотых долей миллиметра. Такое малое расстояние между обкладками конденсатора способствует увеличению емкости датчиков и тем самым – снижению влияния паразитных емкостей соединительных проводов, но при этом повышает чувствительность таких датчиков к температуре окружающей среды. Это происходит из-за того, что тепловое линейное расширение материалов, из которых они изготовлены, оказывается соизмеримым с величиной зазоров между обкладками, и при разработке емкостных датчиков следует предусматривать конструктивные и иные меры уменьшения указанного влияния теплового расширения, а также средства надежного крепления неподвижных и подвижных обкладок во избежание малейших люфтов.

Кроме того, нежелательным свойством одинарных емкостных датчиков (см. рис. 72, д) с малым зазором является возникновение силы притяжения между пластинами конденсатора, которая ранее в приборах электростатической системы была полезной. В дифференциальном преобразователе (см. рис. 72, е) эта сила может быть снижена вплоть до нуля.

Отрицательное влияние на емкостные датчики с малым зазором оказывает даже малейшее увлажнение и засорение обкладок. Поэтому их необходимо тщательно обрабатывать и герметизировать.

Начальная емкость емкостных датчиков с малым зазором  $C_0 \approx 10 - 200$  пФ.

На основе подобных емкостных датчиков могут быть созданы датчики силы, ускорения и давления. Средства для первоначального преобразова-

ния этих величин в малое перемещения – те же, что использовались ранее, в тензорезистивных датчиках.

Для создания датчика силы измеряемая сила преобразуется в малое перемещение с помощью упругого элемента, жесткость которого будет определять пределы измерения силы.

Чтобы преобразовать ускорение в малое перемещение, используется сила инерции, действующей на тело с массой  $m$  и упругий элемент, преобразующий эту силу в перемещение. Значение массы и жесткость упругого элемента будут определять диапазон измеряемых ускорений и собственную частоту колебаний подвижной системы датчика.

Вначале давление преобразуется в силу – через площадь мембраны  $S$ , а затем сила преобразуется в малое перемещение с помощью упругого элемента. Для преобразования емкости конденсатора в электрическое напряжение или ток применяются вторичные электрические преобразователи.

Две схемы включения емкостных датчиков, предназначенных для преобразования переменных величин, представлены на рис. 73. Это, например, датчики виброускорений и переменных давлений, в том числе конденсаторные микрофоны.

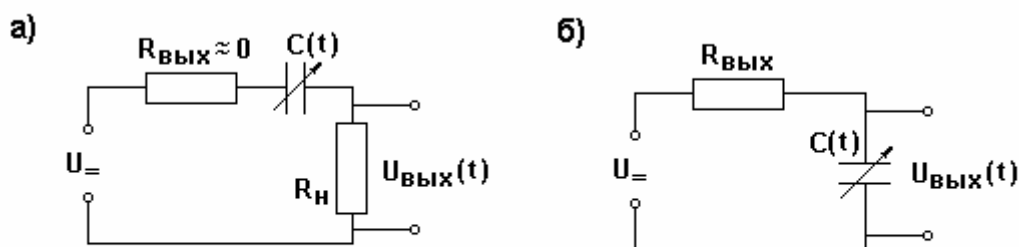


Рис. 73. Схемы включения емкостных датчиков переменных величин

Первая схема (см. рис. 73, а) работает в режиме заданного напряжения, поэтому выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  источника питающего постоянного напряжения  $U$  должно быть как можно меньше. Если емкость датчика изменяется гармонически

$$C(t) = C_0 + \Delta C \sin \Omega t ,$$

то при постоянном напряжении заряд этого конденсатора будет изменяться так же:

$$q(t) = UC(t) = U(C_0 + \Delta C \sin \Omega t),$$

и ток заряда конденсатора  $i(t) = q'(t)$  будет создавать на небольшом сопротивлении нагрузки  $R_H$  падение напряжения

$$U_{\text{вых}}(t) = i(t)R_H = q'_i(t)R_H = UR_H \Delta C \Omega \cos \Omega t.$$

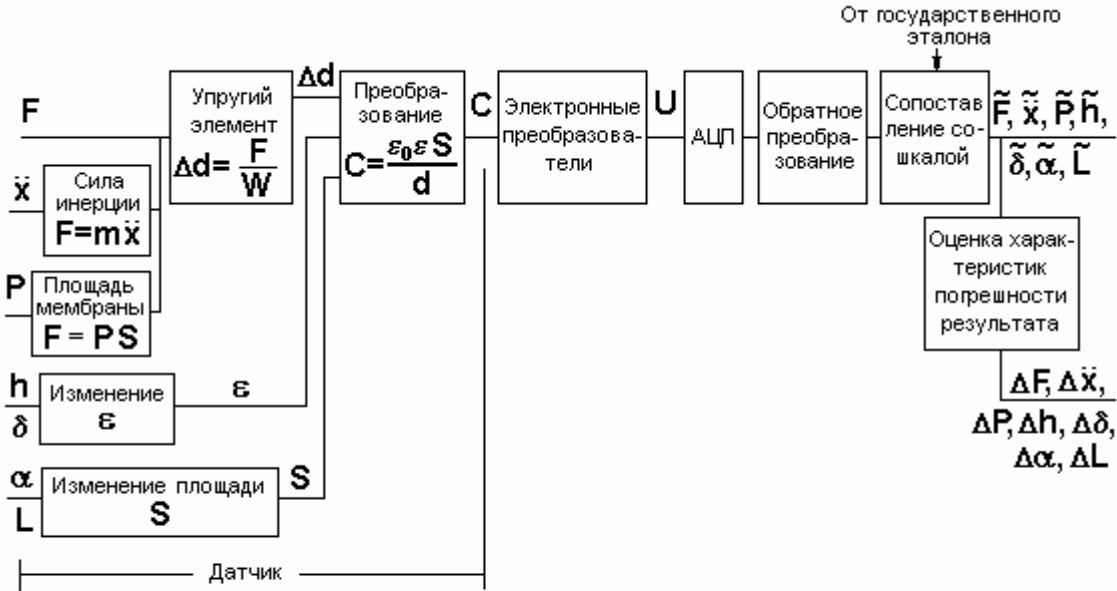


Рис. 74. Цепочки измерительных преобразований, выполняемых с участием емкостных датчиков

Вторая схема (рис. 73, б) работает в режиме заданного заряда. Последовательно с источником питающего напряжения включается большое сопротивление для того, чтобы конденсатор не успевал перезаряжаться, и заряд на нем оставался неизменным. Тогда, при гармоническом изменении емкости напряжение на конденсаторе будет меняться, как

$$U(t) = \frac{UC_0}{C_0 + \Delta C \sin \Omega t} \approx U \left( 1 - \frac{\Delta C}{C_0} \sin \Omega t \right).$$

При достаточном напряжении питания, не превосходящем значения напряжения пробоя малых зазоров (350 В), и последующем усилении может быть достигнута необходимая чувствительность такого преобразования. Полученное в результате переменное напряжение выпрямляется и фильтруется, затем поступает на вход АЦП.

Цепочки измерительных преобразований, выполняемых при применении емкостных датчиков, представлены на рис. 74. Ведущие фирмы мира применяют емкостные чувствительные элементы для создания датчиков ускорения и малых перемещений. Наиболее чувствительные емкостные датчики создаются с применением полупроводниковых микротехнологий. Так, фирма "Analog Devices" (США), известная своей микроэлектронной продукцией, выпускает малогабаритные емкостные датчики ускорения на кристалле кремния размером  $3.05 \times 3.05 \times 1.0$  мм с параметрами: зазор между обкладками конденсатора – 1.3 мкм, емкость – 0.1 пФ, максимальное изменение емкости 0.01 пФ, несущая частота 1 МГц, инерционная масса 0.1 мкг. Основная погрешность датчика не превышает 0.5 %.

### 8.7. Индуктивные датчики

Индуктивные датчики входят в класс электромагнитных преобразователей и являются параметрическими датчиками. Эти датчики выполняют преобразование измеряемой величины в изменение индуктивности за счет изменения параметров магнитной цепи катушки индуктивности.

Индуктивность катушки, намотанной медным проводом и содержащей  $w$  витков, в общем случае равна

$$L = \frac{w^2}{Z_M} = \frac{w^2}{R_M + jX_M},$$

где  $Z_M = R_M + jX_M$  – комплексное магнитное сопротивление цепи, по которой замыкается магнитное поле катушки.

Магнитные цепи большинства индуктивных датчиков устроены таким образом, чтобы потери в этих цепях были минимальны. Кроме того магнитные цепи этих датчиков состоят, в основном, из магнитомягкого материала, имеющего высокую магнитную проницаемость  $\mu$ , и одного или двух воздушных зазоров, магнитное сопротивление которых настолько велико, что оно, в основном, определяет магнитное сопротивление всей цепи. При зазоре, образованном двумя плоскими параллельными поверхностями, расстояние между которыми равно  $d$ , а площадь равна  $S$ , его магнитное сопротивление, а значит, и магнитное сопротивление всей цепи равно

$$R_d = d / (\mu_0 S),$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха.

В результате начальная индуктивность реальных индуктивных датчиков с воздушными зазорами, площадь которых одинакова и равна  $S$ , а суммарная длина воздушного зазора равна  $d$ , выражается приближенной формулой

$$L \cong \frac{\mu_0 S}{d} w^2. \quad (49)$$

Приближенный характер формулы вызван влиянием полей рассеяния на краях воздушного зазора.

Из формулы (49) видно, что на значение индуктивности катушки влияют только такие измеряемые величины, которые могут быть преобразованы в изменение площади  $S$  или величины зазора  $d$ , или, иными словами, в изменение магнитного сопротивления магнитной цепи датчика.

На первый взгляд, преимущество следовало бы отдать преобразованию измеряемой величины в изменении площади. Тогда преобразование было бы линейным. Но из-за краевых эффектов, вызванных рассеянием магнитного потока, линейность не может быть достигнута. Кроме того возникают конструктивные сложности организации подобного преобразования. Поэтому в большинстве индуктивных датчиков используется зависимость индуктивности либо от изменяемой величины зазора, либо от изменения магнитного сопротивления всей цепи в целом за счет перемещения сердечника внутри катушки вдоль ее оси.

На рис. 75, а и 75, б показаны два одиночных индуктивных датчика, работающих по рассмотренным принципам. Первый из них – датчик с малым зазором, изменение которого составляет от 0.01 мм до 1.0 мм. Второй – датчик, реагирующий на значительные перемещения до 100 мм. Обоим этим датчикам свойственен серьезный недостаток, из-за которого датчики такой конструкции не имеют практического применения. В них на перемещаемую деталь действует значительная электромагнитная сила, зависящая от положения этой детали (якоря).

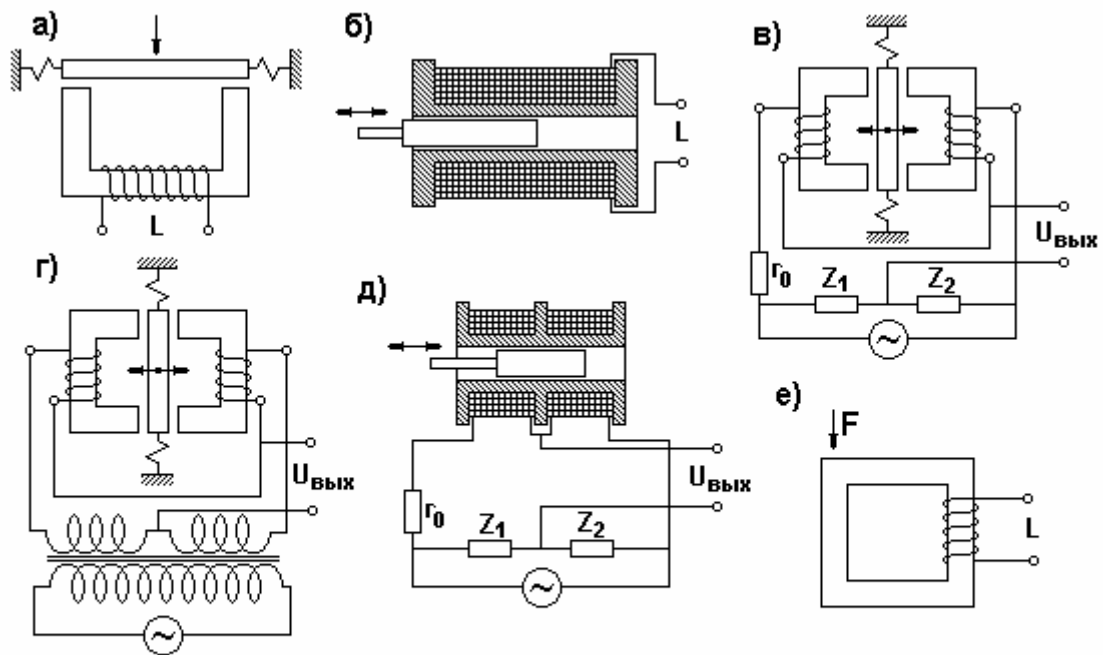


Рис. 75. Примеры устройства и схем включения индуктивных датчиков

Влияние электромагнитной силы существенно снижается у дифференциальных индуктивных датчиков, конструкция которых и схемы включения показаны на рис. 75 в – д. Приведенные схемы включения могут быть применены в любом индуктивном датчике независимо от его конструкции. Данные схемы представляют собой неравновесные мосты, позволяющие получать на выходе нулевой сигнал при нулевом значении измеряемой величины. При этом значении мосты должны быть уравновешены по двум составляющим, поскольку это мосты переменного тока (см. также раздел 5.2.1). Реактивная составляющая катушек легко выполняется примерно одинаковой, ибо она определяется, в основном, количеством витков и частично – полями рассеяния, которые уравниваются конструктивными методами. Активные компоненты сопротивления катушек индуктивности различаются из-за неоднородности сопротивления проволоки, которой она намотана. Для того, чтобы уравновесить мост по этой активной компоненте, в то плечо, в котором активное сопротивление оказалось меньше, включают сопротивление  $r$ , подгонкой которого мост уравнивается.

Отклонение измеряемой величины от нуля вызывает в измерительной диагонали появление выходного сигнала переменного напряжения, кото-

рый при последующих преобразованиях усиливается, выпрямляется и фильтруется, затем подается на вход АЦП, преобразуется в код и передается в компьютер для дальнейших стандартных преобразований и математической обработки.

Первичные преобразования измеряемых величин в изменение длины зазора аналогичны тем, которые выполняются в тензорезистивных и емкостных датчиках. Преобразование силы в малое перемещение осуществляется с помощью подходящего упругого элемента с точно известной жесткостью  $W$ . Преобразование ускорения в силу происходит путем использования силы инерции, действующей на тело с точно известной массой  $m$ . Это тело крепится на перемещаемую часть упругого элемента датчика. Для преобразования давления в силу, а затем – в перемещение используется мембрана с точно известной площадью, жестко связанная с перемещаемым элементом.

Датчики, показанные на рис. 75, б, д, используются только для измерения значительных перемещений  $L$ .

Из формулы (42) следует, что преобразование длины зазора в индуктивность нелинейно. Существенного приближения к линейности достигают путем изменения конфигурации поверхностей, образующих зазор. Достижимые погрешности индуктивных датчиков составляют от 0.5 % до 2 %. Эти погрешности возникают из-за наличия движущихся элементов, полей рассеяния, потерь в сердечнике из-за гистерезиса и вихревых токов, действия электромагнитных сил, зависящих от положения перемещающего элемента.

Существенным достоинством индуктивных датчиков, которое оправдывает их промышленное применение, является значительная мощность выходного сигнала, которая существенно превышает мощность выходных сигналов емкостного, пьезоэлектрического и тензорезистивного датчиков.

Другая разновидность индуктивных датчиков является *магнитоупругий* или *магнитострикционный* датчик, магнитная цепь которого выполнена из сплошного магнитомягкого материала без воздушных зазоров. В этом датчике при приложении усилия, как показано на рис. 75, е, изменяется коэффициент магнитной проницаемости магнитопровода, вследствие

чего изменяется индуктивность катушки, намотанной на этот магнитопровод:

$$L = \frac{\mu_0 \mu S}{l_M} w^2, \quad (43)$$

где  $l_M$  – средняя длина магнитопровода.

В формуле (43) не учитываются потери на вихревые токи и на гистерезис, которые возникают в материале магнитопровода, и потери от гистерезиса.

Магнитопровод такого датчика изготавливается из материалов, магнитная проницаемость которых изменяется под действием механических напряжений. Для различных материалов относительное изменение магнитной проницаемости может составлять от 0.5 % до 3 % при изменении механического напряжения на 1 МПа. Этот эффект остается стабильным, если материал магнитопровода нагружается не больше, чем на 10 % допустимого предела упругих деформаций.

Магнитоупругие датчики применяются для измерения силы в пределах от 250 до  $10^6$  Н. Погрешность магнитоупругих датчиков зависит от многих факторов: механический и магнитный гистерезис, старение, нестабильность напряжения питания и др. В целом после механической тренировки магнитострикционного датчика с монолитным магнитопроводом может быть достигнута погрешность 2 %.

Достоинствами магнитоупругого датчика является значительная мощность, развиваемая на выходе и его высокая надежность, поскольку он не содержит движущихся элементов.

Студентам рекомендуется в порядке упражнения самостоятельно изобразить цепочки измерительных преобразований, выполняемых с участием индуктивных и магнитоупругих датчиков с целью измерения малых перемещений, силы, давления и параметров виброускорения.

## **8.8. Трансформаторные (взаимноиндуктивные) датчики**



Трансформаторные датчики преобразуют измеряемую величину в изменение коэффициента взаимной индуктивности  $M$ . Эти датчики принадлежат классу электромагнитных датчиков и являются параметрическими. К семейству трансформаторных датчиков относятся линейные и угловые индуктосины.

Трансформаторные датчики, так же как индуктивные, выполняются в виде дифференциальных датчиков. Конструкция дифференциального трансформаторного датчика показана на рис. 76. Средний передвижной элемент (якорь) укреплен упруго и при равенстве нулю измеряемой величины находится точно посередине воздушного зазора. Напряжения, возбуждаемые в частях вторичных обмоток, равны, и, поскольку эти части обмоток включены встречно, выходное напряжение равно нулю. При воздействии измеряемой величины на якорь он перемещается вправо или влево, в результате чего изменяются коэффициенты взаимной индукции между частями первичной и вторичной обмоток, и на выходе появляется напряжение, соответствующее сдвигу якоря, а значит, и значению измеряемой величины.

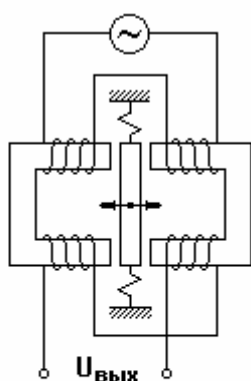


Рис. 76. Схема устройства трансформаторного датчика

На основе трансформаторных датчиков могут быть созданы датчики силы, ускорения и давления путем преобразований этих величин в малое перемещение. Студентам рекомендуется в порядке упражнения самостоятельно изобразить цепочки измерительных преобразований, выполняемых с участием трансформаторных датчиков с целью измерения силы, давления и виброускорений.

На основе трансформаторных датчиков могут быть созданы датчики силы, ускорения и давления путем преобразований этих величин в малое перемещение. Студентам рекомендуется в порядке упражнения самостоятельно изобразить цепочки измерительных преобразований, выполняемых с участием трансформаторных датчиков с целью измерения силы, давления и виброускорений.

ний.

Погрешности трансформаторного датчика примерно равны погрешностям индуктивных датчиков. Наилучшие достигнутые характеристики основной приведенной погрешности таких датчиков с учетом гистерезиса: от 0.15 % до 0.25 %. Дополнительная погрешность от температуры 0.1 – 0.5 %/10 °С.

Достоинствами трансформаторных датчиков являются: высокая выходная мощность и гальваническая развязка измерительной цепи от цепи

питания. При промышленном применении датчиков последнее преимущество иногда является решающим.

### 8.9. Линейный индуктосин

К семейству трансформаторных датчиков относятся линейные индуктосины, которые являются датчиками для измерения больших перемещений (до 10 м) с высокой степенью точности. Обмотки линейных индуктосинов плоские, изготовлены из плоских проводников и наносятся на поверхности двух параллельных плоскостей, взаимное перемещение  $L$  которых подлежит измерению. Эти плоскости расположены на расстоянии 0.1 – 0.5 мм друг от друга, и при их перемещении это расстояние не изменяется.

На рис. 77 показана конфигурация обмоток и их взаимное расположение. Обмотки периодические, период  $X_0$  всех обмоток одинаковый, его значение зависит от максимального перемещения и требуемой точности измерений.

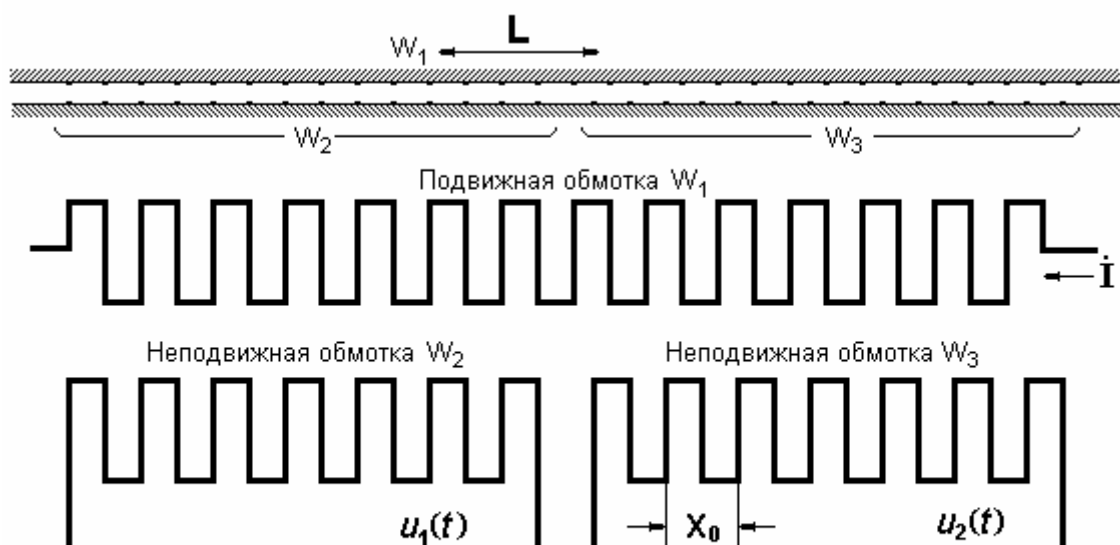


Рис. 77. Обмотки линейного индуктосина

Обычно его выбирают в пределах 1 – 10 мм. Сопротивление обмоток от 0.5 до 10 Ом. В обмотку  $W_1$  пропускается переменный ток силой

0.1 – 0,5 А и частотой 10 – 20 кГц. ЭДС, наводящаяся на вторичных обмотках  $W_2$  и  $W_3$  – от 5 до 20 мВ.

Обмотка  $W_3$  сдвинута относительно обмотки  $W_2$  на расстояние, соответствующее пространственному углу  $\pi/2$ .

Сигналы ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , возникающие на вторичных обмотках, поступают на вход электронной схемы, представленной на рис. 78.

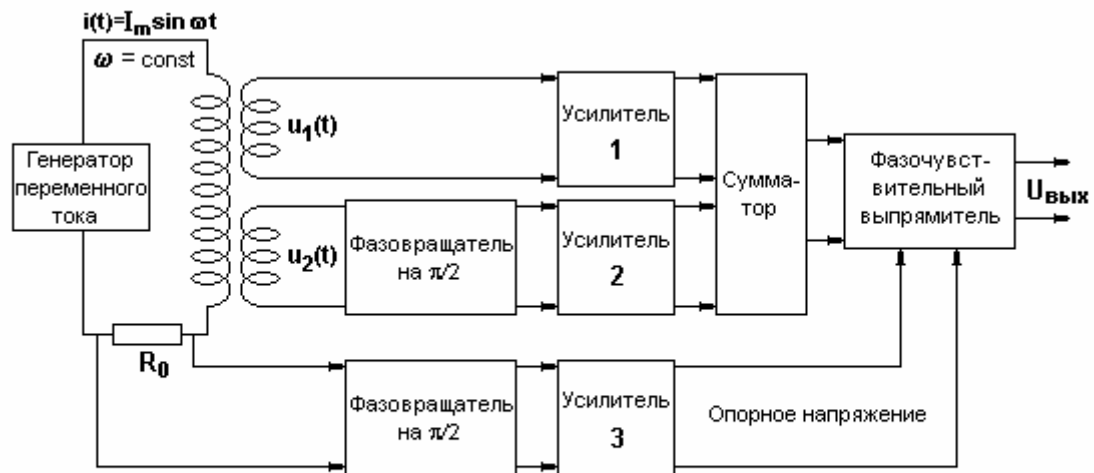


Рис. 78. Структурная схема линейного индуктосина

Если  $X$  – сдвиг первичной обмотки  $W_1$  относительно вторичных обмоток, тогда коэффициент взаимной индуктивности между обмотками  $W_1$  и  $W_2$  зависит от их взаимного расположения следующим образом

$$M_{12} = M_0 \cos 2\pi \frac{X}{X_0},$$

где  $M_0$  – максимальное значение взаимной индуктивности между подвижной и неподвижной обмотками.

Коэффициент взаимной индуктивности между обмотками  $W_1$  и  $W_3$

$$M_{13} = M_0 \cos \left( 2\pi \frac{X}{X_0} + \frac{\pi}{2} \right).$$

Ток в первичной обмотке  $i(t) = I_m \sin \omega t$ . При этом токе во вторичных обмотках индуцируются напряжения:

$$u_1(t) = M_{12} \frac{di(t)}{dt} = M_0 \cos 2\pi \frac{X}{X_0} I_m \omega \cos \omega t,$$

$$u_2(t) = M_{13} \frac{di(t)}{dt} = M_0 \cos \left( 2\pi \frac{X}{X_0} + \frac{\pi}{2} \right) I_m \omega \cos \omega t.$$

Фазовращатель сдвигает напряжение  $u_2(t)$  на  $\pi/2$ , а сумматор складывает его с напряжением  $u_1(t)$ . Если усилители 1 и 2 отрегулированы так, что амплитуды их напряжений на выходе одинаковы, то после их суммирования с точностью до постоянного коэффициента получим:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = M_0 I_m \omega \cos \left( 2\pi \frac{X}{X_0} \right) \cos \omega t - M_0 I_m \omega \sin \left( 2\pi \frac{X}{X_0} \right) \sin \omega t.$$

Воспользовавшись формулой для косинуса суммы двух углов, свернем правую часть:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = M_0 I_m \omega \cos \left( \omega t + \pi \frac{X}{X_0} \right).$$

Мы получили переменное напряжение с частотой  $\omega$  и с фазовым сдвигом относительно первичного тока, зависящим от перемещения  $X$ , то есть пространственный сдвиг преобразовался в электрический фазовый сдвиг. Зависимость фазового сдвига от перемещения периодическая, ее период равен  $X_0$ . Это означает, что измерение больших перемещений с помощью линейного индуктосина сводится к счету периодов, на которые переместилась подвижная обмотка относительно неподвижной, и затем выполняется уточнение дополнительного сдвига внутри периода обмоток  $X_0$ . Данная процедура эквивалентна измерению длины с помощью инструмента, снабженного нониусом. При этом в качестве нониуса служит значение фазового сдвига.

Этот фазовый сдвиг можно преобразовать в код методом, аналогичным описанному в разд. 6.2.4, или измерить с помощью цифрового прибора, но такая процедура занимает очень много времени, в течение которого можно пропустить один или несколько периодов перемещения. При быстрых перемещениях это может привести к катастрофической погрешности. Поэтому предпринимают аналоговое преобразование фазового сдвига в постоянное напряжение с помощью фазочувствительного выпрямителя. На

его второй вход подается опорное напряжение, которое лучше всего получить из цепи первичной обмотки, как падение напряжения на сопротивлении  $R_0$ . Фазовый сдвиг этого напряжения на  $90^\circ$  приведет к тому, что опорное напряжение  $u_0 = U_m \cos \omega t$ . Усилитель 3 этого опорного напряжения (см. рис. 78) играет роль формирователя напряжения прямоугольной формы. Такая форма опорного напряжения обеспечивает хорошую работу фазочувствительного выпрямителя.

В итоге на выходе получается пульсирующее напряжение, постоянная составляющая которого зависит от фазового сдвига между двумя входными напряжениями, то есть от перемещения подвижной обмотки относительно неподвижной на расстояние, не превышающее периода обмоток. Относительная точность такого измерения, конечно, при условии правильного счета периодов, весьма высока. Если, например, период обмоток равен 10 мм, то погрешность измерения смещения внутри одного этого периода, равная 10 %, приведет к абсолютной погрешности, равной 1 мм. При измерении перемещения в один метр относительная погрешность составит всего 0,1 %. Обычно точность измерения фазы гораздо выше, а период обмоток может быть уменьшен. Поэтому подобные датчики позволяют достичь относительной погрешности в 0,01 % и лучше. Существенный вклад в погрешность линейного индуктосина вносит различие между амплитудами напряжений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  и различие между фазовыми сдвигами, вносимыми каждым из трех усилителей. Поэтому особенно тщательно нужно регулировать и стабилизировать коэффициенты усиления усилителей 1 и 2 и сдвиги по фазе, которые они вносят.

Наиболее эффективное применение такие датчики находят в станкостроении, особенно в станочном оборудовании больших размеров – токарных, фрезерных, строгальных станках.

Точно по такому же принципу действуют *угловые индуктосины*. В них обмотки наносятся на двух параллельных дисках, расположенных близко друг от друга. Один из них неподвижный, другой вращается. На них расположены обмотки так же, как и в линейном индуктосине, но с учетом формы дисков – радиально. Угловые индуктосины позволяют измерять угол поворота с абсолютной погрешностью 3 – 10 угловых секунды.

## 8.10. Гальваномагнитные датчики

Гальваномагнитные датчики предназначены для преобразования индукции магнитного поля в напряжение или сопротивление.

Гальваномагнитные датчики основаны на физическом воздействии магнитного поля и носителей зарядов, которые движутся в полупроводниках, находящихся в этом магнитном поле. Практическое применение получили датчики, изготовленные из материалов, в которых используются два эффекта – Холла и Гаусса. Эффект Холла позволяет преобразовать магнитную индукцию в напряжение. Датчики, в которых применяется этот эффект называются *датчиками Холла*.

Эффект Гаусса заключается в изменении электрического сопротивления материала под действием магнитного поля, и поэтому датчики, использующие данный эффект, называются *магниторезисторами*.

### 8.10.1. Гальваномагнитные датчики Холла

Эффект Холла возникает в тонкой полупроводниковой пластине или пленке, по которой идет ток. Если эта пластина или пленка находится в магнитном поле, направленном перпендикулярно ее поверхности, то носители зарядов отклоняются из-за действия силы Лоренца  $F = evB$ , где  $e$  – заряд носителя, движущегося со скоростью  $v$  перпендикулярно магнитному потоку, индукция которого равна  $B$ . Сила Лоренца действует перпендикулярно направлению движения носителей заряда и перпендикулярно направлению магнитного поля. В результате на одной боковой стороне пластины количество носителей зарядов увеличивается, а на другой – уменьшается, и между ними возникает разность потенциалов (ЭДС Холла).

Для того, чтобы плотность тока была равномерной по ширине пластины, электроды, подводящие ток, припаиваются или привариваются по всей ширине пластины. Электроды, с помощью которых с боковых сторон снимается ЭДС Холла (Холловы электроды), привариваются к серединам сторон так, чтобы при отсутствии магнитного поля они оказались на эквипотенциальной линии. Диаметр контактной площадки этих электродов с пластиной обозначим  $a$ . Остальные размеры:  $l$  – длина пластины,  $b$  – ширина

пластины,  $d$  – толщина пластины (см. рис. 79, на котором магнитное поле направлено от читателя). Если  $l/b = 2$  и  $a/l < 0.1$ , то ЭДС Холла равна

$$E_{\text{холл}} = \frac{R_{\text{холл}}}{d} IB \cos \alpha, \quad (44)$$

где  $R_{\text{холл}}$  – постоянная Холла, зависящая от свойств материала пластины (пленки),  $d$  – толщина материала,  $I$  – сила тока,  $B$  – магнитная индукция,  $\alpha$  – угол между вектором магнитного поля и магнитной осью пластины, близко совпадающей с нормалью к ее плоскости.

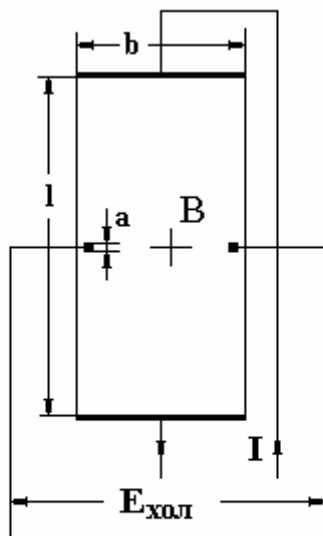


Рис. 79. Схема и размеры датчика Холла

Из выражения (44) следует, что при постоянном токе через полупроводниковую пластину или пленку и при  $\alpha = 0$  ЭДС Холла определяется значением магнитной индукции  $B$ , для измерения которой и применяется этот датчик. Кроме того из этого же выражения следует, что датчик Холла может использоваться и для перемножения двух величин: силы тока и магнитной индукции (или величины, которая может быть преобразована в нее).

Основные полупроводниковые материалы, из которых изготавливаются серийные датчики Холла, – арсенид индия InAs, антимонид индия InSb или арсенид галлия GaAs. Делаются также датчики Холла из германия и кремния. Датчики выполняются в виде тонких пластин или пленок на подложках из слюды, ультрафарфора или стекла. Толщина  $d$  этих пленок составляет от 10 мкм до 200 мкм.

Размеры  $l$  и  $b$  поверхностей датчиков составляют единицы миллиметров.

С помощью датчиков Холла обычно измеряется индукция магнитного поля в труднодоступных местах, подход к которым возможен с одной стороны. Поэтому все четыре проводника подходят к датчику также с одной стороны, как это показано на рис. 79.

Входное сопротивление датчика Холла – это сопротивление между токовыми электродами, оно может составлять от 0.5 Ом до нескольких килоом. Выходное сопротивление датчиков Холла – это сопротивление между холловыми электродами. Обычно входное и выходное сопротивления датчиков Холла близки. Вследствие того, что при применении датчиков Холла в полупроводнике возникает и эффект Гаусса, входное и выходное сопротивление с ростом магнитной индукции увеличиваются.

*Основные характеристики датчиков Холла.*

Как для любого средства измерений, так и для датчиков Холла основными характеристиками являются метрологические характеристики, и первыми среди них – характеристики погрешности. Из-за большого количества причин, порождающих погрешности, они будут подробно рассмотрены в следующем разделе. Здесь представлены характеристики чувствительности и динамические характеристики датчиков Холла, а также варианты использования этих датчиков для измерения мощности и силы электрического тока.

*Гальваномагнитная чувствительность* при  $\alpha = 0$  определяется выражением

$$S_{BI} = R_{\text{хол}} / d ,$$

и для различных типов датчиков составляет 0.3 – 10 В/(А·Тл).

*Чувствительность датчиков Холла к магнитной индукции* определяется при номинальном значении тока  $I_{\text{ном}} = \text{const}$ , как  $S_B = R_{\text{хол}} I_{\text{ном}} / d$ . Для серийно выпускаемых датчиков Холла значение этой чувствительности лежит в пределах 0.03 – 1.0 В/Тл. Значение силы номинального тока у различных датчиков разное. Ограничение силы тока определяется температурой перегрева датчика. Для высокоомных датчиков допустимая сила тока не превышает 50 мА, для низкоомных – 200 мА. В сильных полях появляется нелинейность, которая для лучших датчиков составляет примерно 0.1 – 1.0 %.



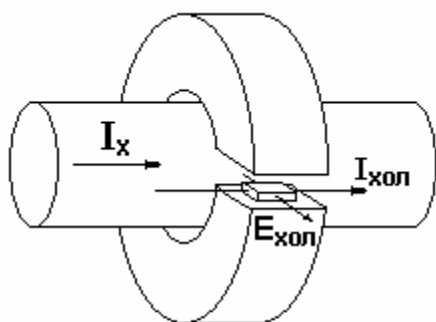


Рис. 80. К принципу измерения силы постоянного тока с помощью датчика Холла

Чувствительность к току определяется при постоянном значении магнитной индукции:  $S_I = R_{\text{хол}} B / d$ . При индукции 1 Тл чувствительность датчиков Холла к току лежит в пределах 0.3 – 50.0 В/А.

Остаточное напряжение датчика Холла действует между холловыми электродами при прохождении по датчику электрического тока, но при отсутствии магнитного поля. Причиной возникновения остаточного на-

пряжения является неточное расположение холловых электродов на эквипотенциальной линии, а также термоэдс, которая при градиенте температуры между холловыми электродами  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  может достигать от 10 до 100 мкВ. Для уменьшения температурного градиента датчик Холла располагают либо на теплопроводной подложке, либо на подложке с помощью теплопроводной, но электроизолирующей пасты.

Динамические характеристики датчиков Холла определяются временем установления ЭДС Холла при ступенчатом изменении индукции магнитного поля или силы тока. Для обычно используемых материалов это время лежит в пределах  $10^{-11} - 10^{-13}$  с, поэтому датчик Холла может быть использован и для измерения индукции переменного магнитного поля, а также для перемножения переменных тока и индукции. В частности, если частота переменного тока и магнитной индукции совпадают и равна  $\omega$ , то ЭДС Холла

$$E_{\text{хол}} = \frac{R_{\text{хол}}}{d} BI \cos \varphi + \frac{R_{\text{хол}}}{d} BI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (45)$$

Постоянная составляющая напряжения (45) может быть отделена от переменной составляющей путем фильтрации, и тогда с помощью датчика Холла может быть построен ваттметр для измерения активной и реактивной мощности электрического тока. Ток в нагрузке должен быть преобразован в индукцию магнитного поля, как это показано на рис. 80, а напря-

жение на нагрузке – в ток через датчик Холла. Сила тока нагрузки, как правило, велика и составляет от десятков до десятков и сотен тысяч ампер. Удобным способом преобразования сильных токов в индукцию является концентрация магнитного потока, окружающего проводник с током, с помощью магнитопровода, который охватывает этот проводник, как это схематически показано на рис. 80. Такой же прием используется в токовых клещах. В зазор магнитопровода, индукция в котором пропорциональна силе тока, вводится датчик Холла, и через него пропускается ток, пропорциональный напряжению. Подобное преобразование тока в индукцию магнитного поля с последующим применением датчика Холла реализуется, например, фирмой АВВ в датчиках для измерения и регистрации больших постоянных токов. Достоинством таких датчиков заключается в том, что они обеспечивают гальваническую развязку средства измерений от мощной электрической цепи, что способствует эффективной борьбе с помехами (см. разд. 6.4) и гарантируют безопасность персонала.

### **8.10.2. Источники погрешности датчиков Холла**

Погрешность датчиков Холла возникает по следующим причинам.

1. Нестабильность тока, пропускаемого через датчик. Метод уменьшения этой погрешности – стабилизация тока.

2. Собственное магнитное поле, создаваемое витком с током (см. рис. 79). Направление этого поля совпадает или противоположно направлению поля, индукция которого измеряется. Индукция собственного поля датчика в отсутствие близко расположенных ферромагнитных тел обычно не превышает  $10^{-6} - 10^{-4}$  Тл. Но на практике приходится измерять индукцию магнитного поля в довольно узких зазорах электрических машин и аппаратов. В условиях, когда ферромагнитные детали объекта расположены в непосредственной близости от датчика, индукция собственного магнитного поля достигает  $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$  Тл, что приводит к существенной погрешности измерения.

Метод уменьшения этой погрешности - проведение обратного провода тока точно под серединой датчика Холла, так, чтобы виток, образуемый

проводами, подводящими ток к датчику, имел минимальную площадь, как это показано на рис. 81, а..

3. Неточность присоединения холловых электродов к эквипотенциальной линии датчика вызывает аддитивную составляющую погрешности (погрешность нуля). Для хотя бы частичного устранения этой причины можно использовать регулируемый делитель напряжения, представленный на рис. 81 б. Такой делитель составлен из высокоомных сопротивлений, его центральное сопротивление – регулируемое.

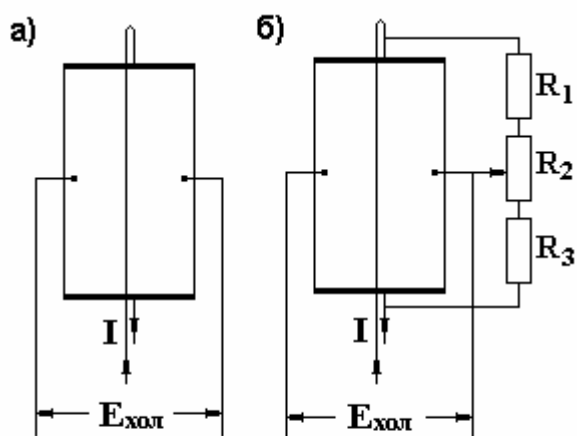


Рис. 81. Способы уменьшения некоторых погрешностей датчиков Холла

4. Температурные погрешности возникают из-за нескольких причин.

а) нагревание датчика проходящим через него током.

б) нагревание датчика от внешних источников тепла.

в) термоэдс в цепи холловых электродов.

г) изменение температуры датчика вследствие эффекта Пельтье, возникающего в цепи тока.

В силу действия этих причин изменяется температура датчика, а вместе с ней изменяется и градиент температуры между точками присоединения холловых электродов. Метод борьбы с температурными погрешностями с помощью теплопроводящих паст изложен ранее в разделе 7.10.1. Он сводится к уменьшению градиента температуры практически до нуля.

5. Нелинейность датчика в сильном поле. Метод коррекции – линеаризация при известной функции прямого или обратного преобразования.

Основная погрешность большинства серийно выпускаемых и применяемых датчиков Холла не превышает 0,5 – 1,0 %. Использование сложных методов коррекции погрешностей и термостатирование датчика при его применении позволяет достичь погрешности 0,2 %.

### 8.10.3. Магниторезистивные датчики

Магниторезистивные датчики или *магниторезисторы* (МР) представляют собой разновидность гальваномагнитных датчиков, в которых под действием магнитного поля изменяется сопротивление электрическому току. В этом проявляется эффект Гаусса. Под действием магнитного поля траектории носителей заряда искривляются, скорость их движения в направлении электрического поля замедляется, и следовательно, увеличивается сопротивление. Уравнение преобразования индукции магнитного поля в сопротивление терморезистора выглядит следующим образом:

$$R_B = R_{B=0} \left( 1 + A |uB|^m \right),$$

где  $R_{B=0}$  – сопротивление магниторезистора при отсутствии магнитного поля,  $A$  – магниторезистивный коэффициент, зависящий от материала и формы магниторезистора,  $u$  – подвижность носителей заряда,  $B$  – индукция магнитного поля,  $m$  – показатель степени, равный 2 в слабых полях, когда  $uB < 1$ , и равный 1, когда  $uB > 1$ .

Функция преобразования магнитной индукции в сопротивление четная, поэтому сопротивление магниторезистора увеличивается как в постоянном, так и в переменном магнитном поле. Максимальная чувствительность достигается, когда магнитная ось магниторезистора направлена по внешнему полю или против него. Кроме того, чувствительность магниторезистора зависит от его формы, а именно от отношения длины резистора к площади его поперечного сечения: чем больше это отношение, тем больше коэффициент  $A$  и тем больше чувствительность.

Лучшие материалы для изготовления магниторезисторов – антимонид индия InSb, арсенид индия InAs и сплавы антимонида индия с антимонидом никеля NiSb.

Основными характеристиками магниторезисторов являются начальное сопротивление  $R_{B=0}$  и чувствительность  $S_B = dR / dB$ . Ток питания магниторезисторов разных типов лежит в пределах от 1 до 100 мА в зависимости от его начального сопротивления, которое может принимать значения от сотых долей ом до десятков килоом. Рабочий диапазон температуры в условиях применения магниторезистора от минус 273 до 327 °С.

Верхняя частота реакции магниторезисторов достигает 10 МГц.

Применение магниторезисторов пока ограничено вследствие технологических трудностей обеспечения повторяемости их метрологических характеристик. Поэтому основной областью применения магниторезисторов является использование их в релейном режиме в целях, например, фиксации наличия или отсутствия магнитного поля или превышения индукцией магнитного поля некоторого заданного уровня.

### 8.11. Датчики скорости вращения

Наиболее распространенными датчиками скорости вращения являются аналоговые датчики (*тахогенераторы*) и дискретные датчики – преобразователи скорости вращения в частоту импульсов.

Тахогенератор – это коллекторный генератор постоянного тока, статор которого изготовлен из хорошо стабилизированных постоянных магнитов, обеспечивающих погрешность воспроизведения индукции магнитного поля в зазоре до 0.05 %. В этом поле вращается ротор с обмоткой, скорость которого равна измеряемой скорости вращения. В обмотке ротора возбуждается постоянное напряжение, пропорциональное скорости его вращения. Это напряжение через коллектор подается на выходные зажимы. В результате в условиях эксплуатации предельно достижимая погрешность тахогенератора может достигать значения 0.2 %.

Принцип работы простейших дискретных датчиков скорости вращения заключается в счете числа оборотов  $N$  в единицу времени. Для измерения больших скоростей с удовлетворительной точностью этого достаточно. Однако для измерения малых скоростей с повышенной точностью применяются датчики, у которых частота импульсов на выходе есть величина, кратная числу оборотов в минуту, а именно  $f_{\text{имп}} = KN$ . Преобразование частоты в код выполняется с помощью АЦП, описанных ранее, в разд. 6.2.3.

Ввиду многообразия дискретных датчиков скорости вращения приведем лишь некоторые примеры оптических и магниторезистивных датчиков, представленные на рис. 82.

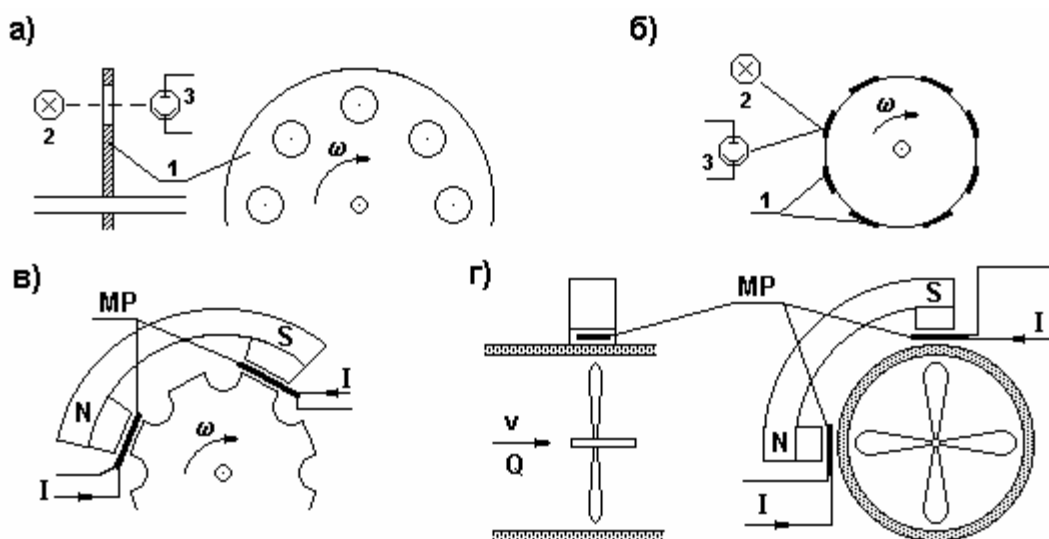


Рис. 82. Примеры датчиков скорости вращения

В простейшем оптическом датчике скорости вращения (см. рис. 82 а) используется диск 1 с  $K$  отверстиями или прорезями. Этот диск монтируется на вал, скорость вращения которого требуется измерить. По одну сторону диска устанавливается источник света 2, по другую – приемник света 3, в качестве которого может быть использован фотодиод или фототриод. При вращении вала, а вместе с ним и диска свет, попадающий на приемник, прерывается  $K$  раз за один оборот, и частота следования импульсов от фотоприемника  $f_{\text{имп}} = KN$ , где  $N$  – измеряемая скорость вращения. Эти импульсы от фотоприемника воспринимаются электронной схемой, усиливаются и формируются в виде потока однородных импульсов напряжения или тока.

При невозможности установить на вал подобный диск в датчике скорости вращения может использоваться отраженный свет (рис. 82, б). На поверхность вала с помощью специальной краски или иного материала параллельно оси вращения с равномерным шагом наносятся  $K$  полос 1. Луч света от источника 2 направляется на поверхность вала, а фотоприемник воспринимает отраженный свет. Если вал темный, наносят светлые полосы, если вал отшлифован и хорошо отражает свет, полосы - темные. При

этом частота импульсов света, воспринимаемых фотоприемником, также есть  $f_{\text{имп}} = K N$ , где  $N$  – измеряемая скорость вращения.

Для применения магниторезистивного датчика скорости вращения на вал устанавливается зубчатое колесо с  $K$  зубцами или используется имеющаяся на объекте шестерня из магнитного материала. На некотором расстоянии от этого зубчатого колеса монтируется магнит с полюсными наконечниками так, чтобы расстояние по дуге между ними было кратно шагу зубчатого колеса (рис. 82, в). На полюсных наконечниках магнита устанавливаются магниторезисторы, сопротивление которых увеличивается при совпадении зубцов колеса с полюсами магнита. За один оборот колеса или шестерни количество таких совпадений будет равно  $K$ . При питании магниторезисторов постоянным током  $I$  на них за один оборот колеса возникнет  $K$  импульсов напряжения, которые затем могут быть усилены, и из них сформируются импульсы одинаковой формы. Частота импульсов равна  $f_{\text{имп}} = K N$ , где  $N$  – скорость вращения зубчатого колеса или шестерни.

Аналогичным образом может быть измерена скорость вращения турбинного расходомера, расположенного в трубе (или в специальной вставке) из немагнитного материала. Такой метод можно применять для измерения скорости движения  $v$  по трубе или расхода  $Q$  горючих жидкостей и газов. Для его реализации в немагнитную вставку или в трубу из немагнитного материала монтируется крыльчатка из магнитомягкого материала с  $2K$  лопастями. На наружной поверхности трубы устанавливается магнит с полюсными наконечниками и магниторезисторы МР (рис. 82 г). При движении по трубе жидкости или газа крыльчатка вращается со скоростью, пропорциональной скорости движения среды. Сопротивление тензорезисторов будет изменяться с той же частотой, то есть  $f_{\text{имп}} = K N$ , где  $N$  – скорость вращения крыльчатки.

Для измерения экстремально малых скоростей могут быть полезными угловые индуктосины с малым шагом обмоток.

В многоканальных измерительных информационных системах наиболее удобными датчиками скорости являются тахогенераторы, поскольку их выходной сигнал есть постоянное напряжение, зависящее от измеряемой

скорости. Этот сигнал того же вида, что и сигналы в других каналах системы.

## 8.12. Метрологические характеристики датчиков

Все датчики являются представителями наиболее обширной группы измерительных преобразователей. В настоящее время большинство датчиков – это аналоговые измерительные преобразователи, хотя с развитием микроэлектроники количество датчиков с дискретным (цифровым) выходным сигналом неуклонно возрастает. Это происходит в результате объединения чувствительных элементов датчиков с микроэлектронными преобразователями и АЦП. Характеристики преобразования датчиков стремятся сделать линейными, но это удается далеко не всегда.

Для линейных датчиков нормируются следующие метрологические характеристики:

диапазон изменения входного сигнала измерительной информации;

коэффициент преобразования, представляется своим номинальным значением;

для датчиков электрических величин - входное сопротивление или импеданс с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него;

выходное сопротивление или импеданс с указанием номинального значения и пределов допускаемых отклонений от него;

пределы основной **относительной** погрешности в виде двучленной формулы (22), нормируются посредством указания значений коэффициентов  $c$  и  $d$ ; при наличии существенной случайной составляющей погрешности выполняется раздельное нормирование характеристик систематической и случайной составляющих;

для некоторых датчиков, например датчиков температуры нормируется абсолютная погрешность;

пределы допускаемой дополнительной погрешности (по каждой из влияющих величин раздельно);

одна из полных динамических характеристик, соответствующих назначению преобразователя, в обоснованных случаях допускается нормиро-



вать частные динамические характеристики с указанием номинальных значений и пределов допускаемых отклонений от них.

В соответствии с ГОСТ 8.009 случайная составляющая считается существенной, если ее среднеквадратическое значение составляет не менее 10 % от общей погрешности.

Для преобразователей с незначительной нелинейностью, которая рассматривается, как причина *погрешности от нелинейности*, мультипликативная погрешность выделена быть не может. Поэтому для таких преобразователей основная погрешность нормируется пределом допускаемой основной приведенной погрешности, как для аналоговых приборов. Все остальные метрологические характеристики те же самые, что и у линейных аналоговых преобразователей. Заметим только, что при этом из-за нелинейности преобразователей нормируются частные динамические характеристики, чаще всего время реакции.

Для преобразователей с существенной нелинейностью нормируются те же характеристики, что и в предыдущем случае, за исключением коэффициента преобразования и полных динамических характеристик, которые не применимы к нелинейным преобразователям.

Вместо коэффициента преобразования указывается номинальная функция преобразования в виде функциональной зависимости, графика или таблицы. Отклонения реальных функций преобразования от номинальной учитываются в составе основной погрешности, нормируемой, как в предыдущем случае, в форме приведенной погрешности.

В качестве динамической характеристики нормируется, как правило, частная динамическая характеристика – время реакции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Измерительная информационная техника и метрология : лаб. практикум. В 5 ч. / В. А. Андрианов [и др.]; под общ. ред. Г. Н. Солопченко. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003.

Кнорринг В. Г. Метрология, стандартизация, сертификация : учеб. пособие / В. Г. Кнорринг, М. Г. Марамзина. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 239 с.

Крылова Г. Д. Основы стандартизации, метрологии, сертификации / Г. Д. Крылова. – М. : ЮНИТИ, 1999. – 711 с.

Левшина Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

Лифшиц И. М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации / И. М. Лифшиц. – М. : Юрайт, 2000. – 285 с.

Метрология и электро/радио измерения в телекоммуникационных системах / В.И. Нефедов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2001. – 383 с.

Основы метрологии и электрические измерения / Б.Я.Авдеев [и др.]; под общ. ред. Е. М. Душина. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

Спектор С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений / С. А. Спектор. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

Тартаковский Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений : учеб. для вузов / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – М. : Высш. шк., 2001. – 205 с.

Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс / А. Э. Фридман. – СПб. : НПО «Профессионал», 2008. – 280 с.

Харт Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт. – М. : Мир, 1999. – 391 с.